
TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Studijní program: N2612 – Elektrotechnika a informatika

Studijní obor: 3906T001 – Mechatronika

Impulsní zatížitelnost výkonových rezistorů

Pulse load capability of power resistors

Diplomová práce

Autor: **Bc. Josef Petřvalský**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Konzultant: Ing. Martin Černík, Ph.D.

V Liberci dne 15. 5. 2013



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií

Ústav MTI

Školní rok: 2012/13

Zadání diplomové práce

Název projektu: Impulsní zatížitelnost výkonových rezistorů

Řešitel: Bc. Josef Petřvalský

Studijní obor: Mechatronika

Vedoucí projektu: Ing. Miroslav Novák, Ph.D.

Zadání:

1. Proveďte rešerši na téma impulsní přetížitelnost rezistorů. Motivací je určit správné dimenzování rezistorů pro stupňový spouštěč k transformátorkům.
2. Navrhněte a sestrojte aparaturu pro měření zatížitelnosti rezistorů. Rezistory budou zatěžovány definovanými pulsy, generovanými výkonovým programovatelným zdrojem.
3. Měřením určete bezpečnou přetížitelnost metal-oxidových a vinutých rezistorů a výkonech jednotek wattů. Měření proveďte opakovaně na několika kusech rezistoru a výsledky statisticky vyhodnoťte.

Doporučená literatura:

- [1] Metal oxide film resistors. In: Faithful Link Industrial Corp. [online]. Taiwan: Faithful Link Industrial [cit. 2012-07-22]. Dostupné z: www.faithfullink.com/docs/R3_MO.pdf
- [2] Metal oxide film resistor. In: www.ResistorGuide.com: your guide to the world of resistors [online]. 2012 [cit. 2012-07-22]. Dostupné z: <http://www.resistorguide.com/metal-oxide-film-resistor/>
- [3] PULSE & OVERLOAD CAPABILITY: Application Note. In: TT electronics [online]. 2. vyd. Surrey: TT elec-tronics [cit. 2012-07-22]. Dostupné z: http://www.welwyn-tt.com/pdf/application_notes/Pulse-Overload_AN.pdf

Datum zadání: 10. 10. 2012

Podpis vedoucího projektu:



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Datum :

Podpis:



PODĚKOVÁNÍ

Zde bych chtěl velice poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Miroslavu Novákovi, Ph.D a konzultantu Ing. Martinovi Černíkovy, Ph.D za jejich podporu a mnoho cenných rad při tvorbě, návrhu a realizaci diplomové práce.

Poděkování patří také všem co se podíleli na projektu “Otevřená univerzita”. za pomoc při financování výdajů součástí k realizaci diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat všem kteří mi pomohli – rodině a přátelům, za jejich morální i finanční pomoc při studiu.

I když už nejsi mezi námi, to je pro tebe mami!



Anotace

Cílem diplomové práce je navrhnout a sestavit vhodnou aparaturu pro měření impulsní zatížitelnosti výkonových rezistorů a určit bezpečnou mez přetížitelnosti metal-oxidových a vinutých rezistorů o výkonech jednotek wattů.

Diplomová práce se zaměřuje na impulsní zatěžování sériově vyráběných rezistorů stejné hodnoty přesně definovanými pulsy, kde na základě naměřených dat lze určit statistickými metodami mez bezpečné přetížitelnosti rezistorů.

Jednotlivá měření jsou prováděna automaticky s minimálním zásahem uživatele. Zajištění potřebných hardwarových zásahů (udání pulsu, přepínání rozsahů, apod.) je prováděno programem. Rovněž komunikace mezi počítačem a měřicími zařízeními je obstaráno programem. Veškeré parametry jsou snímány multifunkční měřicí kartou připojenou k počítači a pomocí programu vytvořeného v prostředí Matlab vyhodnocovány, ukládány a zpracovávány.

KLÍČOVÁ SLOVA

Impulsní, impuls, rezistor, odpor, metal-oxid, vinutý, teplota



Annotation

The aim of this thesis is to design and construct a suitable apparatus for measuring pulse load capacity of power resistors and determine safe overload capability limitation of metal-oxide and wire wound resistors on the performance of several watts.

Diploma thesis focuses on pulse handing capability mass-produced power resistors of the same value precisely defined pulses, where based on the measured data can be determined by statistical methods limit overload capability of resistor.

Each measurement is performed automatically with minimal user intervention. Provision of the necessary hardware interventions (change scale, choice of pulse, etc.) is performed by the program. Also, communication between computer and measuring devices is service of the program. All parameters measured circuit is sensed by measuring multi-card attached to the computer and using the program created in Matlab to: evaluated, stored and processed.

Keywords

Impulse, resistor, resistance, metal-oxide, wirewound, overload



Seznam obrázků

Obr. 1: Přehled typů rezistorů	18
Obr. 2: Řez vinutým rezistorem s chladičem [6]	19
Obr. 3: Řez filmovým rezistorem [6]	20
Obr. 4: Řez metal-oxidovým rezistorem [9]: 1 izolační substrát tvořící tělo, 2 oxid kovu s negativním TCR (teplotní součinitel rezistivity), 3 oxid kovu s pozitivním TCR, 5, 6 kovová hlava spojená s připojovacím vodičem, 7, 8 kontakty 9 Ochranné pouzdro	21
Obr. 5: Typický teplotní průběh tlustovrstvého filmového rezistoru [6]	28
Obr. 6: Časový průběh oteplení rezistoru pro statické a impulsní zatížení [1]	36
Obr. 7: Tyristor s odlehčovacím obvodem typu RC [1]	41
Obr. 8: Ilustrace vzniku zapínacího proudu [10]	42
Obr. 9: Schéma stupňového spouštěče [10]	43
Obr. 10: Schematické znázornění měřicí aparatury	44
Obr. 11: Realizace zapojení dle blokového schématu (Obr. 10.)	45
Obr. 12: Blokové schéma programu měření	46
Obr. 13: Zhotovená měřicí stanice	47
Obr. 14: Impulsní charakteristika Royal ohm (Royal283), 82 Ω , 5W metal-oxide, sada 01	51
Obr. 15: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů Royal ohm (Royal283), 82R, 5W (0x – sada, 01.x – první rezistor ze sady 01)	52
Obr. 16: Fázový (binární) diagram Ni-Cr [23] vlevo naměřený, vpravo modelový od počáteční teploty dle Chana [26]	53
Obr. 17: Krystalové struktury (fáze) mřížek [27]: a) prosté kubické, b) kubické plošně centrované (FCC - «), c) kubické prostorově centrované (BCC - 6)	54
Obr. 18: Impulsní charakteristika Hitano E. C. (Ges053), 82 Ω , 5W vinutý, sada 01	54
Obr. 19: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů Hitano E. C. (GES053) 82R 5W	55
Obr. 20: Impulsní charakteristika SR Passive (CLR5W), 4,7 Ω , 5W drátový	56
Obr. 21: Cu-Ni fázový diagram [29]	57
Obr. 22: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů SR Passive (CLR5W) 4R7 5W	57
Obr. 23: Impulsní charakteristika Royal ohm (Royal321), 4,7 Ω , 5W drátový	58
Obr. 24: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů Royal ohm (Royal321) 4R7 5W	59
Obr. 25: Graf tepelného zatížení vinutých rezistoru GES 82R 5W při impulsní zkoušce	62
Obr. 26: Graf tepelného zatížení vin. rezistoru 4R7 5W při impulsní zkoušce	63
Obr. 27: Krabicový graf – legenda	64
Obr. 28: Impulsní charakteristika – určení místa nevratné degradace rezistivního elementu	65



Obr. 29: Krabicový diagram rezistorů 82R 5W, vlevo – drátový (Ges053), vpravo – metal-oxidový rezistor

(Royal283) _____ 66

Obr. 30: Krabicový diagram rezistorů 4R7 5W, vlevo – drátový SR Passive (CLR5W), vpravo – drátový Royal ohm

(Royal321) _____ 66



Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Přehled nejpoužívanějších materiálů pro vedení, včetně rezistorů [7]</i>	29
<i>Tab. 2: Přehled vlastností rezistorů v závislosti na použité technologii výroby [6]</i>	30
<i>Tab. 3: Použité přístroje</i>	45
<i>Tab. 4: Měřené rezistory- specifikace výrobce</i>	47
<i>Tab. 5: Průběh měření s nastavenými kroky pro jednotlivé rezistory</i>	49
<i>Tab. 6: Procentuální zastoupení elementárních prvků v odporových drátech měřených rezistorů určené spektrometrem Zeiss Supra FE-SEMs</i>	60
<i>Tab. 7: Fyzické parametry měřených drátových rezistorů</i>	60
<i>Tab. 8: Rekapitulace statistických výsledků – mez přetížitelnosti (vztaženo k délce pulsu 5 ms)</i>	67
<i>Tab. 9: Rezistory určené pro pulsní charakter zátěže, stejné podmínky jako u experimentu (katalogové hodnoty pro délku pulsu 5 ms)</i>	67

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Jednotka	Popis
c	$[\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}]$	měrná tepelná kapacita
d	$[\text{m}]$	průměr
d_{drat}	$[\text{m}]$	průměr vodiče
d_{trub}	$[\text{m}]$	průměr keramického tělíska
\bar{e}	$[\text{C}]$	elektrický nábor
e	$[-]$	emisivita
E	$[\text{Vm}^{-1}]$	intenzita elektrického pole
f	$[\text{Hz}]$	kmitočet
G_p	$[\text{rad}]$	polohový úhel
I	$[\text{A}]$	proud
J	$[\text{A/m}^2]$	proudová hustota
K	$[\text{J}\cdot\text{K}^{-1}]$	tepelná kapacita
l	$[\text{m}]$	délka
l_{drat}	$[\text{m}]$	délka drátu
m_e	$[\text{kg}]$	hmotnost elektronu
n	$[-]$	koncentrace částic
N	$[-]$	počet částic
o_{zav}	$[\text{m}]$	obvod závitu
p	$[\text{Pa}]$	tlak
p_o	$[\text{Pa}]$	tlak vzduchu
P	$[\text{W}]$	výkon
P_{max}	$[\text{W}]$	maximální impulsní výkon

P_N	[W]	dovolený (konstrukční) výkon
Q	[C]	elektrický náboj
q	[WK]	schopnosti tělesa vyzářit (odevzdat) teplo
R	[Ω]	elektrický odpor
S	[m ²]	plocha
S_{drat}	[m ²]	průřez odporového drátu
t	[s]	čas
t_a	[s]	doba odstupu pulsů
t_I	[s]	doba trvání pulsu
U	[V]	napětí
W	[J]	energie
W_{max}	[J]	maximální energie
α	[Wm ⁻² K ⁻¹]	činitel přestupu tepla
α_R	[K ⁻¹]	teplotní součinitel měrného odporu
γ	[S]	měrná elektrická vodivost
δ	[Wm ⁻² K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmanova konstanta
ϑ	[°C]	teplota
ϑ_0	[°C]	pokojová teplota
ϑ_a	[°C]	teplota okolí
ϑ_{max}	[°C]	maximální dovolená teplota
ϑ_{teor}	[°C]	teoretická teplota
Θ	[K]	absolutní teplota
Φ	[ppm/V]	napět'ový koeficient
λ	[Wm ⁻¹ K ⁻¹]	tepelná vodivost



ρ	$[\Omega\text{m}]$	měrný elektrický odpor (rezistivita)
ρ_0	$[\Omega\text{m}]$	měrný elektrický odpor při pokojové teplotě
φ_1, φ_2	$[\text{V}]$	elektrický potenciál



Obsah

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	2
PROHLÁŠENÍ	3
ANOTACE	5
ANNOTATION	6
SEZNAM OBRÁZKŮ	7
SEZNAM TABULEK	9
SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	10
<u>1. ÚVOD.....</u>	<u>15</u>
<u>2. REZISTOR.....</u>	<u>17</u>
2.1 ROZDĚLENÍ REZISTORŮ	17
• 2.1.1 Vinuté rezistory	19
• 2.1.2 Filmové rezistory	20
• 2.1.3 Metal-oxidové rezistory	21
2.2 TEORETICKÝ ROZBOR REZISTORU	22
• 2.2.1 Elektrický odpor kovového vodiče	22
• 2.2.2 Teplotní závislost odporu	26
2.3 ENERGETICKÁ BILANCE REZISTORU	31
2.4 STATICKÝ POHLED NA ZATÍŽENÍ REZISTORU	33
2.5 IMPULSNÍ POHLED NA ZATÍŽENÍ REZISTORU	36
2.6 APLIKACE S IMPULSNÍ ZÁTĚŽÍ	39
• 2.6.1 Odlehčovací obvody	41
• 2.6.2 Stupňový spouštěč transformátoru	42



<u>3.</u>	<u>EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....</u>	<u>44</u>
3.1	NÁVRH MĚŘICÍHO OBVODU	44
3.2	VÝSLEDKY EXPERIMENTU	49
3.3	OBLAST POŠKOZENÍ REZISTORU	50
• 3.3.1	Oblast poškození metal-oxidových rezistorů	51
• 3.3.2	Oblast poškození vinutých rezistorů	53
3.4	SPEKROGRAFIE MĚŘENÝCH DRÁTOVÝCH REZISTORŮ	60
• 3.4.1	Porovnání tepelného zatížení odporového elementu s impulsní charakteristikou	62
<u>4.</u>	<u>STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ MEZE PŘETÍŽITELNOSTI.....</u>	<u>64</u>
4.1	KRABICOVÝ DIAGRAM MEZE PŘETÍŽITELNOSTI REZISTORŮ	66
4.2	REKAPITULACE STATISTICKÝCH VÝSLEDKŮ EXPERIMENTU	67
<u>5.</u>	<u>SHRUTÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ.....</u>	<u>69</u>
<u>6.</u>	<u>ZÁVĚR.....</u>	<u>71</u>
	<u>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</u>	<u>73</u>
	<u>PŘÍLOHY.....</u>	<u>77</u>
A.	SPEKTROMETRIE A MAKRO-MIKROSKOP	78
B	OBSAH CD-ROM	81

1. ÚVOD

Rezistory patří mezi nejpoužívanější pasivní prvky ve výkonové elektrotechnice. Základním parametrem je hodnota odporu a mezní výkon, který je schopen rezistor přeměnit na teplo a vyzařit do okolí. V krátkodobém až pulsním zatížení se mařená energie rozloží v čase, proto je možné rezistor zatížit během pulsu vyšším příkonem než je jeho limit pro trvalé zatížení.

U běžných rezistorů výrobci v technické specifikaci (datasheetu) neuvádí údaje od dovolené impulsní zátěži [14]. Tyto údaje můžeme najít pouze u speciálních rezistorů [15]. Pro řadu aplikací je ale tento údaj nezbytný (RL/RC odlehčovací obvody spínacích součástek, stupňové spouštěče, apod.). Konstruktor obvodu spínacích součástek musí proto sáhnout po několika násobně dražších výkonových rezistorech, které mají udanou charakteristiku chování při opakovaném impulsním zatížení.

Impulsní zatížení rezistorů se v katalogových listech výrobců uvádí v několika formách [15]. Pro pulsy trvající <1 ms se používá omezení z testu rázovou vlnou 1,2/50 μ s. Pro pulsy trvající <100 ms se uvádí graf pohlcení energie tzv. „energy capability“. Pro pulsy >100 ms se používá přetěžovací charakteristika tzv. „overload rating“.

Při konstrukci těchto zařízení je zapotřebí navrhnout maximální jmenovité zatížení rezistorů, a jejich vhodný výběr z řady typických hodnot, které výrobci nabízí. V případě volby nízké hodnoty jmenovitého výkonu dojde k destrukci rezistoru a tím k poruše zařízení, které je jeho součástí. Volba rezistoru s vyšší hodnotou maximálního jmenovitého zatížení, kde nemůže dojít k destrukci vlivem přetížení je na místě, ale musí se počítat s jinými faktory: větší rozměr, hmotnost a cena.

Koncem devadesátých let minulého století se na trhu objevuje nový typ rezistoru – metal-oxidový [9]. Metal-oxidový rezistor tvoří keramické tělísko, které je potaženo vrstvou metaloxidu. Do této vrstvy se vytvoří drážka pro zvýšení elektrického odporu a nastavení přesné hodnoty, více na str. 21.

Oproti tomu klasický vinutý rezistor je složen z odporového drátu namotaného na keramické tělísko. Bližší pohled na přednosti použití buď metal-oxidového, či klasického vinutého rezistor bude rozebrán v jednotlivých kapitolách. Zaměřením se na optimalizaci návrhu této elektronické součástky nám pomůže ušetřit finanční prostředky, hmotnost elektronického zařízení jako celku a z toho vyplývající uplatnění na trhu.

Cílem této práce je provést impulsní zátěžové testy pro sadu běžně dostupných klasických vinutých (drátových) rezistorů a pro sadu metal-oxidových rezistorů. Určit bezpečnou, opakovatelnou mez přetížitelnosti. Porovnat impulsní meze zatížitelnosti s rezistory, které ji mají výrobcem udanou v datasheetu, většinou se jedná o speciální rezistory navržené pro impulsní typ zátěže. Zda je to krok správným směrem ukážou až výsledky měření, zda použití běžně dostupných metal-oxidových či vinutých rezistorů než speciálních impulsních výkonových rezistorů s udanou impulsní charakteristikou.

Práce je koncipována do dvou celků. První část se zabývá rezistory obecně jejich fyzikálním popisem, přednostmi, použitím a vlastnostmi. Další část se věnuje tématu impulsní zatížitelnosti, vlastním návrhem řešení s teoretickým rozbořem a vyhodnocením naměřených dat.

2. Rezistor

Rezistor představuje označení pro pasivní elektronickou součástku přeměňující elektrickou energii na energii tepelnou. Materiál, z kterého je tvořen odporový element, klade elektrický odpor protékajícímu proudu a otepluje se. Zahřívání je způsobeno srážením elektronů s krystalovou mřížkou odporového elementu, kdy se předá část jejich kinetické energie, získané z elektrického pole během jejich volného pohybu.

Většina výkonových rezistorů do výkonu desítek až stovek wattů je vytvořena na válcovém jádru z vysoce čisté keramiky. Používaná keramika má vysokou teplotní vodivost, vysokou odolnost proti vlhkosti, schopnost odolat teplotním šokům, je chemicky inertní vůči okolnímu prostředí a v první řadě dobrý izolant. Odporový prvek může být uhlíkový film, metaloxidová vrstva či navinutý odporový drát.

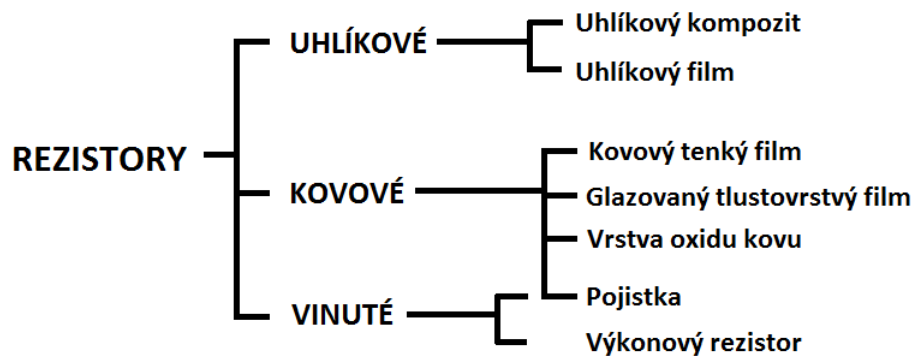
2.1 Rozdělení rezistorů

Rezistory lze rozdělit do tří základních skupin:

- Drátové
- Hmotové
- Vrstvové

Jak už z názvu vyplývá drátové a vrstevné rezistory se liší jak technologií výroby, tak použitými materiály. Pro bližší pohled se této problematice budeme věnovat o něco později. Zatím nám postačí představa drátových rezistorů jako navinutého drátu na keramickém tělísku a vrstevné rezistory, využívající odporové vrstvy.

Používané materiály pro rezistory zpravidla bývá legovaný kov či uhlík. Následující přehled nám přiblíží další možnosti použití a inovace základní technologie výroby v závislosti na použitých materiálech.

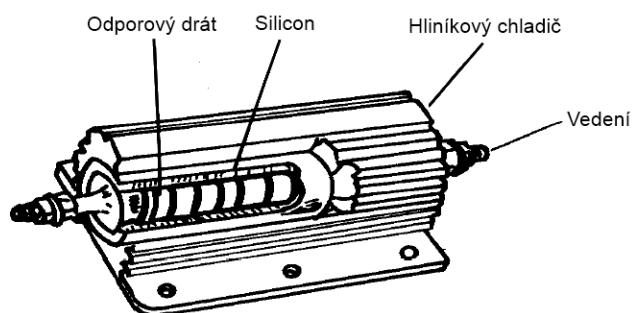


Obr. 1: Přehled typů rezistorů

Požítí rezistorů v elektronice je nezměrné. Následující přehled je hrubým výčtem použití rezistoru jako jednu z hlavních součástí: odlehčovací obvody, omezovače napětí, omezovače proudu, disipatibilní prvky, aj.

2.1.1 Vinuté rezistory

Hlavní model rezistoru vychází z rovnoměrně uloženého odporového prvku proto, aby bylo dosaženo co největší využití plochy pro přestup tepla na povrch rezistoru. Pro lepší účinky chlazení se přidává pasivní chladič, jak je vidět na řezu vinutým rezistorem na Obr. 2.

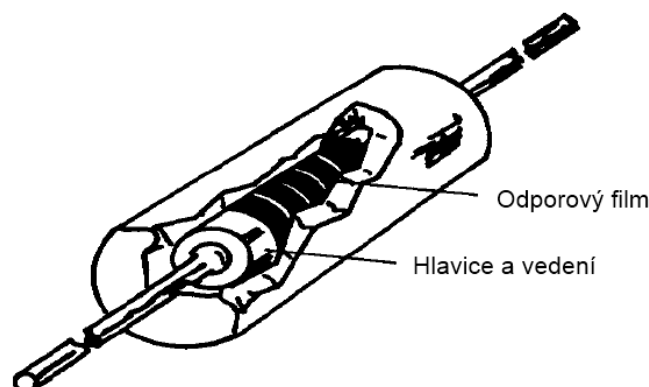


Obr. 2: Řez vinutým rezistorem s chladičem [6]

Vinuté rezistory vynikají svou vysokou odolností proti přetížení. Dojde-li k trvalému přetížení, dochází k velkému oteplení vinutého drátu. K poškození dojde až při vysoké teplotě, kdy použitý odporový materiál dosáhne teploty tání. Bod tání používaných materiálů jsou ve stovkách °C. Nejpoužívanější materiál pro vinuté rezistory je Nichrom, který má bod tání až 1550 °C [8], záleží na poměru jednotlivých příměsí viz. Tab. 1.

2.1.2 Filmové rezistory

Filmové, též tenkovrstvé rezistory, jsou tvořeny obdobně jako vinuté rezistory, s tím rozdílem že místo vinutého drátu je použita tenká vrstva odporového materiálu. Tento způsob realizace odporové vrstvy zaručuje mnohem lepší přesnost nastavení hodnoty odporu, nižší citlivost na změnu teploty a stárnutí, v porovnání s vinutými rezistory.



Obr. 3: Řez filmovým rezistorem [6]

Filmové rezistory se dělí na dvě skupiny [5]:

- Tenkovrstvé (tloušťka $< 0,0001$ cm)
- Tlustovrstvé (tloušťka < 0.001 cm]

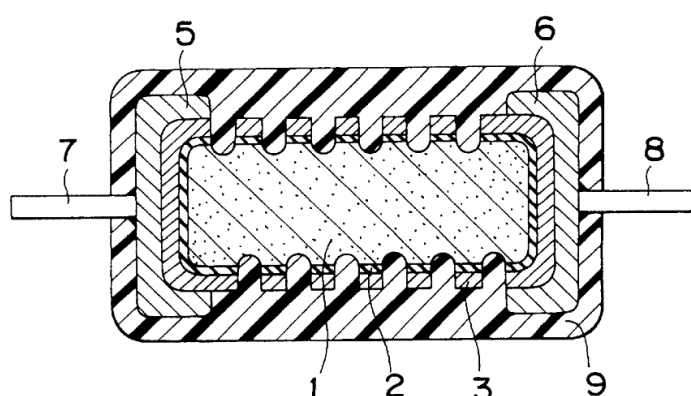
Tlustovrstvé rezistory jsou levnější a méně přesné než tenkovrstvé. Je to dáno technologií výroby. Pro přesné nastavení hodnoty odporu tenkovrstvého rezistoru je zapotřebí laser, kterým se vytvoří drážky pro přesné trimrování hodnoty odporu. Avšak jejich výkonová škála je pouze do 5 W* (vinuté rezistory do 1 000 W*).

*Data z www.cz.farnell.com, www.tme.eu k datu 21.11.2012

2.1.3 Metal-oxidové rezistory

Metal-oxidový rezistor je tvořen tenkými vrstvami rezistivního materiálu podobně jako filmový rezistor. Tato technologie výroby umožňuje vytváření odporů, které vynikají neměnností vlastního elektrického odporu při vzrůstající/klesající teplotě.

Dvouvrstvý metaloxidový rezistor byl patentován v roce 1999 [9]. Tento rezistor, jak vyplývá z názvu, využívá oxidu kovu (metal-oxidu) jako rezistivního prvku.



Obr. 4: Řez metal-oxidovým rezistorem [9]: **1** izolační substrát tvořící tělo, **2** oxid kovu s negativním TCR (teplotní součinitel rezistivity), **3** oxid kovu s pozitivním TCR, **5, 6** kovová hlava spojená s připojovacím vodičem, **7, 8** kontakty **9** Ochranné pouzdro

Jak je znázorněno na Obr. 4, odporový element je tvořen dvěma vrstvami oxidu kovu. První vrstva má pozitivní teplotní součinitel a druhá vrstva má negativní teplotní součinitel rezistivity. Vlivem změny teploty roste či klesá jeho rezistivita a ta souvisí se znaménkem TCR. Pokud máme dvě rozdílné vrstvy metaloxidu, ideálně stejné hodnoty, ale opačného znaménka, při zahřátí či ochlazení dojde ke kompenzaci příspěvků k hodnotě elektrického odporu. Celkový příspěvek bude zanedbatelný k celkové hodnotě elektrického odporu. Tudiž neměnnost elektrického odporu v závislosti na teplotě je zaručena do vyšších teplot, než je tomu tak u ostatních běžně používaných typů rezistorů, které mají pouze kladné či záporné TCR.

Existují i další modifikace základní struktury metal-oxidového rezistoru, se třemi vrstvami, jinou koncepcí drážkování apod. Pro naše potřeby postačí tato základní představa, která se vyskytuje u většiny běžně dostupných metal-oxidových rezistorů.

2.2 Teoretický rozbor rezistoru

2.2.1 Elektrický odpor kovového vodiče

Elektrický odpor definujeme obecně Ohmovým zákonem v integrálním tvaru

$$R = \frac{U}{I} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{I} = \frac{\int_1^2 E \, dl}{\int_S J \, dS}. \quad (1)$$

Kde φ_1, φ_2 je potenciál

E intenzita elektrického pole

J proudová hustota

S plocha

Popř. Ohmův zákon v diferenciálním tvaru

$$J = \gamma E. \quad (2)$$

Kde γ je měrná elektrická vodivost (konduktivita)

Jak vyplývá ze vztahu (1), odpor je závislý na vlastnostech a rozměrech prostředí, v němž elektrické pole a proudová hustota vzniká.

Elektrická vodivost v kovech

Pro přibližnou představu nám postačí úvaha z klasické fyziky, podle níž se mohou volné nosiče náboje vlivem elektrického pole pohybovat uvnitř krystalové mřížky. Pohyb je nutně periodický a během volné dráhy se urychluje. Volnou dráhou rozumíme místo, kde nedochází ke srážkám nosičů náboje s krystalovou mřížkou. Volná dráha je tím větší, čím je méně nehomogenit ve struktuře krystalové mřížky (dislokace, cizí atom – tzv. nečistota). Dojde-li ke srážce, nosič ztrácí část své kinetické energie a předá ji krystalové mřížce. U kovů volnými nosiči náboje jsou elektrony. Během doby volného pohybu elektronu dle Kopala [25], platí

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = m_e \frac{dv}{dt} = eE. \quad (3)$$

Kde m_e je hmotnost elektronu

m obecná hmotnost

v driftová rychlost

e náboj elektronu

Ze vztahu (3) vychází přírůstek rychlosti při konstantní intenzitě E

$$dv = \frac{e}{m} E dt \quad (4)$$

popř.

$$\Delta v = \frac{e}{m} E \Delta t. \quad (5)$$

Při konstantním středním elektrickém poli bude vodičem protékat střední proud a přírůstek energie elektronu, kterou získal při volném pohybu, se při srážce s krystalovou mřížkou předá ve formě tepla. Střední pole je ekvivalentem více složkových polí tvořících celek, pro vnější popis je toto zjednodušení příhodnější. Z toho plyne, že (5) musí platit i pro střední hodnoty

$$v_s = \frac{e}{m_e} E t_s. \quad (6)$$

Kde t_s je časová konstanta

Elektrický proud definujeme jako objem přeneseného náboje plochou za jednotku času

$$I = \frac{Q}{t}. \quad (7)$$

Kde $Q = N.e$ je celkový náboj

N počet elektronů

\bar{e} elektrický náboj elektronu

Proudovou hustotu lze napsat do tvaru dle Höfta [1], či Kopala [25]

$$J = \frac{I}{S_v} = \frac{Q}{S_v t} = \frac{Nes}{S_v dt} = nev. \quad (8)$$

Kde n je koncentrace částic

d tloušťka vodiče

v driftová rychlost

Ze (6), (8) a za pomoci pohyblivosti nosičů náboje μ_0 , dle Kopala [25] plyne

$$J = \frac{e^2}{m_e} nE\tau = en\mu_0 E = \gamma E. \quad (9)$$

Kde μ_0 je pohyblivost nosičů náboje

Experimentálně měřená konduktivita kovů a slitin nabývá hodnot $10^6 - 10^8 (\Omega\text{m})^{-1}$. Podle (9) konduktivita vyjadřuje, jak velká hustota proudu J vznikne ve vodiči při jednotkové intenzitě elektrického pole E .

Opačnou úměrou k předchozím poznatkům je měrný elektrický odpor – rezistivita. Dle Kopala [25] rezistivita vyjadřuje, jaká intenzita elektrického pole E vyvolá v daném materiálu za dané teploty jednotkovou hustotu proudu J .

$$E = \varrho \cdot J. \quad (10)$$

Z (9) a (10) je patrné

$$\varrho = \frac{1}{\gamma} \quad (11)$$

Finálně využitím vztahů (7), (8) a (10) dostaneme

$$I = U \cdot \frac{1}{\varrho} \cdot \frac{S}{l} \quad (12)$$

S použitím Ohmova zákona v integrálním tvaru (1) a rovnice (12) můžeme psát

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{\varrho} \cdot \frac{S}{l}, \quad (13)$$

tedy

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{S}, \quad (14)$$

Jelikož konduktivita je závislá na teplotě [25], tak i zákonitě musí být závislá i odvozená rezistivita a vlastní elektrický odpor. Z klasické fyziky víme, že prakticky všechny materiálové konstanty se mění v závislosti na teplotě. Tudíž i délka vodiče l a plocha vodiče S budou teplotně závislé. Pro nás však délka vodiče l a plocha vodiče S je neměnná, jelikož elektrický odpor měříme za konstantních podmínek – stejné teploty.

Ověřili jsme si platnost Ohmova zákona pro lineární odpory. Avšak platnost Ohmova zákona u metal-oxidových rezistorů má své meze. Máme-li elementární tloušťku metal-oxidové vrstvy v řádech μm , uplatnění tohoto popisu není zcela totožné.

2.2.2 Teplotní závislost odporu

Pro teplotní součinitel α_R měrného odporu ρ je dán Matthiesenovým vztahem [1]

$$\alpha_R = \frac{\partial \rho}{\rho \partial \theta}. \quad (15)$$

Kde θ je absolutní teplota [K]

Jak bylo řečeno v kapitole 2.: Tepelný pohyb částic – kmitání atomové mřížky, je přímo ovlivněno počtem srážek elektronu s mřížkou. Při srážce dojde k předání části kinetické energie elektronu do mřížky, to způsobí zvýšení celkové energie mřížky. Zvýšení vnitřní energie způsobí větší interakce mezi jednotlivými atomy mřížky a celková kmitavost bude vyšší, což představuje nárůst teploty.

Je zřejmé, že pohyb elektronů, resp. jejich srážky s krystalovou mřížkou je mechanismus, který zapříčiní ohřev odporové vrstvy. Tento popis předpokládá ideální podmínky – tj, absolutně čistý materiál. Pro reálný popis by se měl uvažovat také i případ, kdy se volná částice – elektron – srazí na nečistotě obsažené v odporové vrstvě. Tento příspěvek však nezávisí na teplotě odporové vrstvy, ale na obsahu nečistot.

Proto lze rezistivita rozdělit na dvě složky

$$\rho = \rho_S + \rho_\theta, \quad (16)$$

Kde ρ_S je strukturální složka

Závisí na struktuře použitého materiálu, tj. použité příměsi, technologii výroby a je teplotně nezávislá. Složka ρ_θ je složka závislá pouze na teplotě.

Pro další popis musíme vycházet ze vztahu (15), představující teplotní funkci pevné látky.

$$\alpha_R \rho = \frac{\partial \rho}{\partial \theta}. \quad (17)$$

Řešením této diferenciální rovnice je výraz

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\int_{\theta_0}^{\theta} \alpha_R(\theta) d\theta\right). \quad (18)$$

Pro malý rozsah teplot, kdy platí přibližně $\alpha_\theta = konst.$, dostaneme

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha_R(\vartheta - \vartheta_0)). \quad (19)$$

Kde ρ je rezistivita při teplotě ϑ

ρ_0 rezistivita při teplotě ϑ_0

α_R součinitel měrného odporu

ϑ_0 počáteční teplota

ϑ konečná teplota

V katalogích výrobců pasivních součástek se teplotní součinitel měrného odporu značí TCR (Temperature Coefficient of Resistance). TCR se často udává v rozmezí nízkých teplot (25 až 75°C), kde se považuje za konstantní. Bohužel, výrobci většinou nepřikládají informaci o závislosti TCR na provozní teplotě.

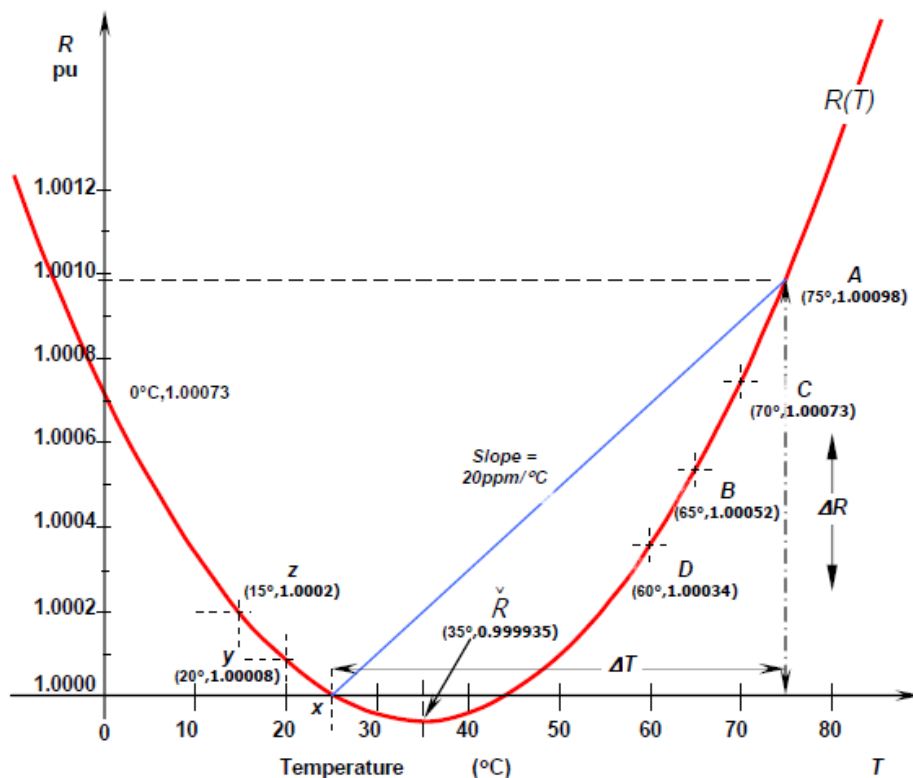
Ze vztahu (19) dostaneme teplotní součinitel měrného odporu

$$\alpha_R = \frac{R - R_0}{R_0(\vartheta - \vartheta_0)}. \quad (20)$$

Kde R je elektrický odpor při teplotě ϑ

R_0 je elektrický odpor při teplotě ϑ_0

Teplotní průběh typický pro tlustovrstvý filmový rezistor je zobrazen na Obr. 5, jak popisuje [6]. Vidíme zde TCR udávané výrobcem v rozmezí provozních teplot – modrá čára se stoupáním 20 ppm, kde je brána jako konstantní.



Obr. 5: Typický teplotní průběh tlustovrstvého filmového rezistoru [6]

Vyjádřením R získáme rovnici popisující změnu elektrického odporu v rezistoru při změnách teploty

$$R = R_0(1 + \alpha\vartheta). \quad (21)$$

Závislost elektrického odporu není pouze na teplotě. Pro úplnější popis vývoje rezistivity budeme vycházet z Williams [6], kde závislost odporu závisí i na napětí. Závislost na napětí vyjadřuje tzv. napěťový koeficient VCR (Voltage Coefficient of Resistance). VCR určuje poměrný vzrůst odporu při zvýšení napětí. Pro nízké frekvence platí

$$R(u, \vartheta) = R_0(1 + \phi u)(1 + \alpha_R \vartheta). \quad (22)$$

Kde u je napětí

ϕ napěťový koeficient

VCR vyjadřuje poměrnou změnu odporu rezistoru při změně napětí o 1 V při konstantní teplotě, tzv. změna odporu při nárůstu napětí.

Dle Moora [16] VCR souvisí s elektrostatickým polem vytvářené připojovacím napětím rezistoru. Jde o tendenci srovnat polarizované molekuly v odporové vrstvě podobnou cestou jako je tomu u dielektrika v kondenzátoru. Typické hodnoty VCR pro jednotlivé druhy rezistorů jsou v Tab. 2.

Pro představu Tab. 1 představuje výčet nejpoužívanějších materiálů v elektronice a jejich použití.

Tab. 1: Přehled nejpoužívanějších materiálů pro vedení, včetně rezistorů [7]

Materiál	Složení	ρ [$\mu\Omega\text{cm}$]	α [K^{-1}]	Použití
Cín	Sn	11,5	0,0042	Pájka
Hliník	Al	2,828	0,0049	Vedení a instalace
Kantal A-1	72 % Fe, 20 % Cr, 5 % Al, 3 % Co	145	0,000 06	Vinutí pecí do 1300 °C
Konstantan	54 % Cu, 45 % Ni, 1 % Mn	49	-0,000 03	Přesné odpory, reostaty
Manganin	86 % Cu, 2 % Ni, 12 % Mn	48	0,000 01	Přesné odpory, bočníky
Měď	Cu	1,75	0,0068	Zdroje, vinutí transformátorů
Mosaz	50 - 99 % Cu, Zn	7,5	0,002 - 0,007	Konstrukční materiál
Nichrom	78 % Ni, 20 % Cr, 2 % Mn	108	0,0002	Vyhřívací tělesa do 1200 °C
Nikelin	67 % Cu, 30 % Ni, 3 % Mn	40	0,000 11	Reostaty, regulační odpory
Platina	Pt	10,9	0,0039	Elektrody, odporové teploměry
Stříbro	Ag	1,629	0,003 81	Pojistkové slitiny, kontakty, polovodiče
Tantal	Ta	15,5	0,003 82	Vysokoteplotní vakuové pece
Uhlík (grafit)	C	33 - 185	-0,006 až 0,0012	Opory, speciální vyhřívací tělesa, elektrody odporových pecí
Zlato	Au	2,35		Kontakty, elektronika
Železo	Fe	9,8	0,006	Konstrukční materiál, uzemnění, bleskosvody

Tab. 2: Přehled vlastností rezistorů v závislosti na použité technologii výroby [6]

	Značka	Jednotky	uhlíkový kompozit	uhlíkový film	metalový tenkovrstvý film	glazovaný tlustovrstvý film		metal oxidový film	vinutý	pojistka
						NN	VN			
Elektrický odpor	R	[Ω]	10-22M	1-10M	1-5M	1-2M	300k-1G	15-100k	0,1-1,5m	0,1-4K
Maximální zatěžovací výkon	P_R	[W]	1	2	2,5	2	90	7	>300	2
Maximální teplota	θ_{max}	[$^{\circ}\text{C}$]	150	125	300	175	100	235	275	160
Max. pracovní napětí	U_m	[V]	500	500	500	1k	100k	650	2,5k	160
Napěťový koeficient (VCR)	φ	[$10^{-6}/\text{V}$]	200	50	5	10	-	0,1	<1	-
Reaktance	C_R	[pF]	0,25	0,5	-	-	0,125	0,5	-	-
Tepelný součinitel	α_R	[$10^{-6}/\text{K}$]	-500-1000	50-350	± 350	± 200	± 150	± 500	50	500
Tepelný odpor	R_s	[K/W]	80	27	90	35	13	26	0,3	50

2.3 Energetická bilance rezistoru

Obecně lze rozdělit formy energie do několika skupin. Vycházejme z Höfta [1], který jej rozdělil následovně:

a) Elektrická energie přeměněná v teplo

Průchod proudu vodičem způsobuje oteplení, je to zapříčiněno částicemi, nositelkami elektrického náboje. Část své kinetické energie předají ostatním částicím, tím dojde ke zvýšení vnitřní energie - zvýšení neuspořádaného pohybu a ta se projeví změnou teploty.

$$W = \int UI \, dt. \quad (23)$$

b) Oteplení materiálu bez změny skupenství

$$W = \int K \, d\vartheta. \quad (24)$$

Kde K je tepelná kapacita tělesa

c) Odvod tepla pohybem okolních částic

$$W = \iiint \alpha \, d\vartheta \, dS \, dt. \quad (25)$$

Kde α je činitel přestupu tepla

S povrch tělesa

Činitel přestupu tepla α závisí na druhu materiálu, konstrukci, tepelných podmínkách okolí a intenzitě proudění vzduchu. Podle Höfta [1] lze činitel přestupu tepla α určit následovně

$$\alpha \left[\frac{W}{m^2 K} \right] = G_p d^{-0,38} \cdot (\vartheta - \vartheta_a)^{1/4} \cdot \sqrt{\frac{p}{p_0}}. \quad (26)$$

Kde G_p je polohový úhel

d průměr válcového rezistoru

ϑ_a teplota okolí

p tlak vzduchu

p_0 normální tlak vzduchu

Podmínky použití: $p < p_0$, $\vartheta - 150$ až 200 °C, $d = 0,4$ až $4 \cdot 10^{-2}$ m. Velikost G_p závisí na poloze rezistoru vůči základní desce.

d) Vedení tepla, tzn. tepelný tok plochou vlivem teplotního gradientu

$$W = \iint \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial r} dS dt \quad (27)$$

Kde λ je tepelná vodivost

e) Vyzařování tepla do okolí

$$W = e\sigma \iint \vartheta^4 dS dt \quad (28)$$

Kde e je emisivita prostředí

σ je Stefan-Boltzmanova konstanta

Zákon zachování energie: energie dodaná se musí rovnat vydané

$$\int U \cdot I dt = \iiint \alpha d\vartheta dS dt + \iint \lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial r} dS dt + e\sigma \iint \vartheta^4 dS dt + \int K d\vartheta. \quad (28a)$$

2.4 Statický pohled na zatížení rezistoru

Identifikace konstant K a α může být obtížné. Tuto překážku lze řešit pomocí reálné součástky, jak popisuje Höft [1] ve své knize.

$$P = UI = e(\vartheta - \vartheta_0) + K \frac{d\vartheta}{dt}. \quad (29)$$

Kde $P = P_N$ jmenovitý výkon

U napětí na rezistoru

I proud na rezistoru

R odpor rezistoru

$$R \cdot i^2 dt = \delta(\vartheta - \vartheta_0) dt + K d\vartheta. \quad (30)$$

Tato diferenciální rovnice představuje maximální teplotu uvnitř rezistoru. Zavedeme teplotní časovou konstantu vyplývající z řešení diferenciální rovnice energetické bilance (28a)

$$\tau_\vartheta = \frac{K}{q} = \frac{c\delta V}{\alpha S}. \quad (31)$$

Kde q je činitel schopnosti tělesa vyzářit teplo

a určíme konečnou podmínku pro ustálenou teplotu ($t \rightarrow \infty$)

$$\frac{d\vartheta}{dt} = 0. \quad (32)$$

Z rovnice (29) pro jmenovitý výkon je nejvyšší dovolená teplota

$$\vartheta_{max} - \vartheta_0 = \Delta\vartheta_m = \frac{P_N}{q}. \quad (33)$$

Kde ϑ_{max} maximální dovolená teplota

P_N maximální dovolený výkon

A diferenciální rovnice

$$dt = \tau_{\vartheta} \frac{d\vartheta_{max}}{\vartheta_{max} - \vartheta}. \quad (34)$$

Řešení této rovnice je ve tvaru

$$\frac{t-t_0}{\tau_{\vartheta}} = -\ln \frac{\vartheta_{max} - \vartheta}{\vartheta_{max} - \vartheta_0}. \quad (35)$$

Kde t doba zatížení rezistoru

t_0 výchozí čas.

Jednoduchou matematickou úpravou dostaneme tvar

$$\vartheta - \vartheta_0 = (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{t-t_0}{\tau_{\vartheta}}\right) \right]. \quad (36)$$

Tato rovnice představuje časový průběh oteplení na rezistoru. Pro použití v praxi je nutné určit konstanty α a K , docílíme toho vyjádřením první derivace předešlé funkce popisující časový průběh teploty.

$$\Delta\vartheta'|_{t=0} = \frac{\vartheta_{max} - \vartheta_0}{\tau_{\vartheta}} = \frac{\Delta\vartheta_m}{\tau_{\vartheta}}. \quad (37)$$

$$\Delta\vartheta'|_{t=0} = \frac{\vartheta_m \cdot \delta}{K} = \frac{P_N}{K}. \quad (38)$$

Z porovnání předchozích rovnic (37) a (38), lze pomocí první derivace funkce vyjádřit teplotní časovou konstantu pomocí koeficientu δ s předpokladem, že se jedná o válcový rezistor o průměru d a že je tvořen z větší části jedním materiálem, z důvodů zjištění měrné tepelné kapacity a hustoty.

$$\frac{\Delta\vartheta_m}{\tau_{\vartheta}} = \frac{P_N}{K}, \quad (39)$$

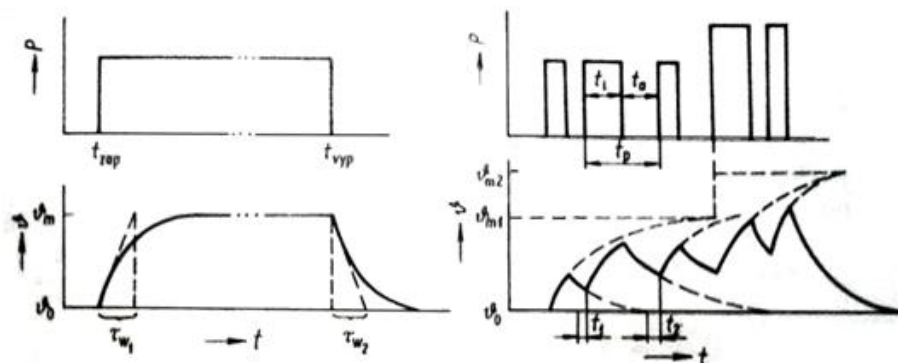
$$\tau_{\vartheta} = c \cdot m \cdot \frac{\vartheta_{max} - \vartheta_0}{P_N}, \quad (40)$$

$$\tau_{\vartheta} = \frac{c \cdot \varrho_m}{4\delta} d, \quad (41)$$

$$\delta = \frac{c \cdot \varrho_m}{4\tau_\theta} d. \quad (42)$$

Hromadně vyráběné rezistory o průměru 3 až 20 mm mají tepelnou časovou konstantu v rozmezí 0,5 až 5 minut. Tepelnou kapacitu lze vypočítat dosazením koeficientu vyzařování tepla vypočteného z činitele přestupu tepla a plochy rezistoru, jak uvádí Höft [1].

2.5 Impulsní pohled na zatížení rezistoru



Obr. 6: Časový průběh oteplení rezistoru pro statické a impulsní zatížení [1]

Jak vyplývá z Obr. 6 impulsní zatížení může být podstatně vyšší než u statického zatížení.

Pro případ rovnoměrných sledů impulsů lze dopočítat ze znalosti statického zatížení (kap. 2.4). Jak znázorňuje Obr. 6, lze na dílčí příspěvky impulsů pohlížet jako na statický problém. [1] Pro tento popis si zavedeme frekvenci změn f , dobu periody T , dobu trvání jednoho impulsu t_i a dobu klidu za t_a jakožto $t_a = (T - t_i)$.

Teplota rezistoru pak kolísá mezi hodnotami ϑ_0 a ϑ_m . Maximální dovolená impulsní teplota ϑ_n je určena z předchozích impulsů. Předehřátí vyjádříme časy $t_1, t_2 \dots t_n$. Pro ustálený periodický stav platí dle rovnice (38)

$$\vartheta_n - \vartheta_0 = (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1 + t_{n-1}}{\tau_\vartheta}\right) \right]. \quad (43)$$

Z rovnice (31) můžeme psát

$$\vartheta_{max} - \vartheta_0 = \frac{P_{max}}{q} = P_N \frac{T}{qt_1}. \quad (44)$$

Pro zbytkovou teplotu, která je současně počáteční teplotou dalšího impulsu, platí

$$\begin{aligned}\vartheta_{0,n-1} - \vartheta_0 &= (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_1+t_{n-1}}{\tau_\vartheta}\right) \right] \exp\left(\frac{t_a}{\tau_\vartheta}\right) = \\ &= (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \left[1 - \exp\left(-\frac{t_n}{\tau_\vartheta}\right) \right].\end{aligned}\tag{45}$$

Pro ustálený periodický děj musí platit $t_{n-1} = t_n$. Z rovnice (45) dostaneme tvar

$$\exp\left(-\frac{t_n}{\tau_\vartheta}\right) = \frac{1 - \exp\left(-\frac{t_a}{\tau_\vartheta}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{T}{\tau_\vartheta}\right)} \approx \frac{t_a}{T}.\tag{46}$$

Pro teplotní časovou konstantu lze zavést předpoklad $\tau_\vartheta \gg T > t_a$, resp. $t_n < \tau_\vartheta$

$$\frac{t_n}{\tau_\vartheta} \cong \frac{t_1}{T}\tag{47}$$

a

$$\begin{aligned}\vartheta_n - \vartheta_0 &= (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \frac{t_1+t_n}{\tau_\vartheta} \approx (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \left(\frac{t_1}{T} + \frac{t_1}{\tau_\vartheta} \right) \approx \\ &\approx (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \frac{t_1}{T}.\end{aligned}\tag{48}$$

Maximální impulsní teplota je omezena teplotní časovou konstantou rezistoru τ_ϑ . Je-li perioda $T \gg \tau_\vartheta$, doba trvání pulsu $t_1 \ll \tau_\vartheta$, T a $\tau_\vartheta, \ll t_a < T$, lze rovnici (46) přepsat do tvaru

$$\exp\left(-\frac{t_n}{\tau_\vartheta}\right) \cong \left(1 - \exp\left(-\frac{t_a}{\tau_\vartheta}\right) \right) \left(1 + \exp\left(-\frac{T}{\tau_\vartheta}\right) \right) \cong 1.\tag{49}$$

Z těchto zavedených předpokladů se teploty $\vartheta_{0n} \sim \vartheta_0$ limitně rovnají, a pro krátké impulsy $\tau_\vartheta, \ll t_a < T$

$$\vartheta_n - \vartheta_0 \cong (\vartheta_{max} - \vartheta_0) \frac{t_1}{\tau_\vartheta}.\tag{50}$$

Pro impulsní výkon tedy z rovnic (44) a (50) platí

$$P_m \cong P_N \frac{\tau_\theta}{t_1}. \quad (51)$$

Výkon dodaný do rezistoru může být vyšší než jmenovitý výkon udávaný v katalogu výrobcem. Je tak velký jako jeho jmenovitá hodnota v závislosti na teplotní časové konstantě rezistoru a na délce impulsu. K stejným výsledkům dospěla i Vishay [18].

$$P_{max} = \frac{P_N}{f t_1} = P_N \frac{T}{t_1}. \quad (52)$$

Kde P_{max} maximální dovolený výkon

t_1 doba trvání pulsu

f kmitočet

Jednoduchou úpravou dostaneme tvar pro maximální napětí rezistoru

$$U_{max} = \sqrt{\frac{P_N R}{f t_1}}. \quad (53)$$

Kde U_{max} maximální dovolené napětí

2.6 Aplikace s impulsní zátěží

Impulsní zatížení rezistorů spočívá v mžikovém zatížení rezistoru trvajícím řádově jednotek mikrosekund až jednotek sekund, kde délka impulsu určuje pro jaké aplikace se měření bude simulovat (brzdění do odporu, odolnost rázové vlně, etc.). Pouze jeden výrobce (Vishay) speciálních rezistorů uvádí v katalogových listech příslušných výrobků grafy zatížitelnosti rezistorů vzhledem k délce impulsu nebo k poměru doby zatěžovacího pulsu a doby periody. Údaj vztažený k poměru doby zatěžovacího pulsu nám však udává velikost opakovatelného zatížení, které bude nižší než při zatížení jen jedním pulsem. Lze tak při znalosti potřebné délky impulsu, která je určena danou aplikací, odečíst jak lze rezistor poddimenzovat. U rezistorů s nižším jmenovitým výkonem se však tyto grafy běžně neuvádí.

Mžikové zatížení se dělí na tři skupiny dle TT elektronik [15], dle doby zatížení:

- velmi krátké pulsy (<1 ms)
- krátké pulsy (<100 ms)
- střední pulsy (typicky >100 s)

Střední zátěžové pulsy se vyskytují u výkonových a brzdových rezistorů. V katalogu se přikládá informace o přetížení vzhledem k délce zatěžovacího pulsu vztažený k pracovní periodě.

Krátké pulsní zatížení trvajícím jednotky až stovky milisekund se uvádí graf pohlcení energie, které nesmí přesáhnout dovolenou mez, jinak dojde k trvalému poškození rezistoru.

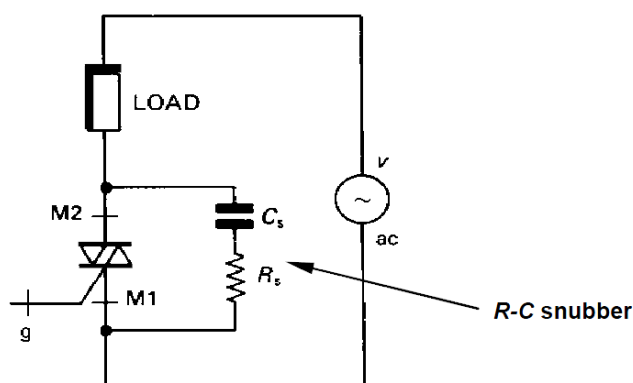
Pro velmi krátké pulsy se používá omezení vyplývající z testu rázovou vlnou $1,2/50$ μ s.

Jak už bylo řečeno v úvodu, oblast použití výkonových rezistorů s impulsním typem zátěže je čím dál více. Nové technologie výroby, nové nároky na přesnost řízení. Často se setkáváme s problémy týkajícími se častých změn žádané hodnoty – regulace. Klademe nároky na frekvenční měniče tj. změnu střídavé a frekvence u řízení PWM. Z toho vyplývá potřeba použití rychlejších tyristor, tranzistorů a potřeba pasivních prvků, které budou odolávat těmto specifickým podmínkám.

Další oblastí použití výkonových rezistorů s impulsním charakterem zátěže jsou indukční stroje. Typickým příkladem indukčního stroje je transformátor, jako zástupce netočivých elektrických strojů a motor, zástupce točivých elektrických strojů. Při rozběhu takového elektromagnetického stroje dochází v okamžiku sepnutí k náhlému zvýšení odebíraného proudu na několiknásobek jmenovité hodnoty, právě vlivem induktivního charakteru stroje. Podrobněji v kapitole 2.6.2

2.6.1 Odlehčovací obvody

Odlehčovací obvody typu: RC, RL, RLC, popř. RDL/RDC představují elektronickou součástku omezující zátkmit při zapnutí/vypnutí spínacího prvku a nastavení požadovaného průběhu sepnutí/vypnutí tyristorů. Dle použitých pasivních prvků se označují zkratkou odvozenou z počátečních písmen použitých součástek: RC – rezistor-kapacita, RL – rezistor-indukčnost či RDL – rezistor-dioda-indukčnost. Kombinací těchto prvků získáme požadované vlastnosti chování odlehčovacího obvodu v problematických místech, kde může dojít k zátkmitu napětí.

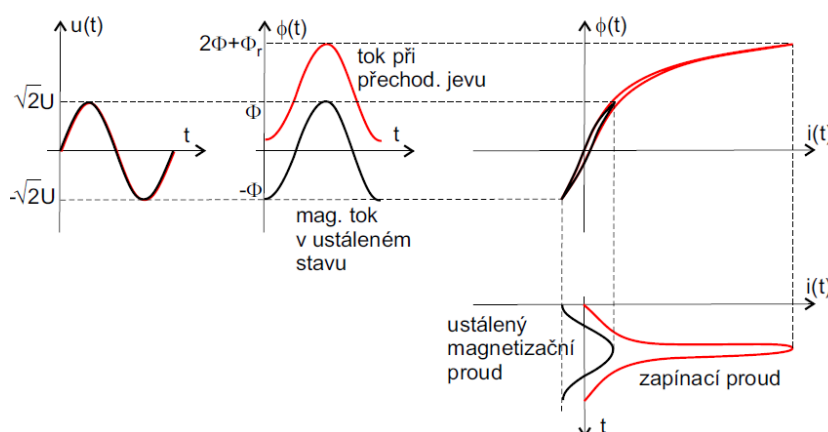


Obr. 7: Tyristor s odlehčovacím obvodem typu RC [1]

U tranzistorů patří odlehčovací obvody mezi klasické přepětové ochrany [24], připojením vnějšího sériového obvodu RC nebo obvodu RDC omezujeme napětové špičky spojené se spínáním v obvodech s indukčnostmi.

2.6.2 Stupňový spouštěč transformátoru

Další oblastí využití výkonových rezistorů je rozběh transformátoru. Při přimknutí transformátoru k elektrické síti dojde vlivem přechodu mezi remanentním magnetickým tokem a magnetickým indukčním tokem, kde transformátor ztrácí svoji impedanci, ke krátkodobému zvýšení jmenovitého proudu tzv. zapínací proud, který je mnohonásobně vyšší než jmenovitý.



Obr. 8: Ilustrace vzniku zapínacího proudu [10]

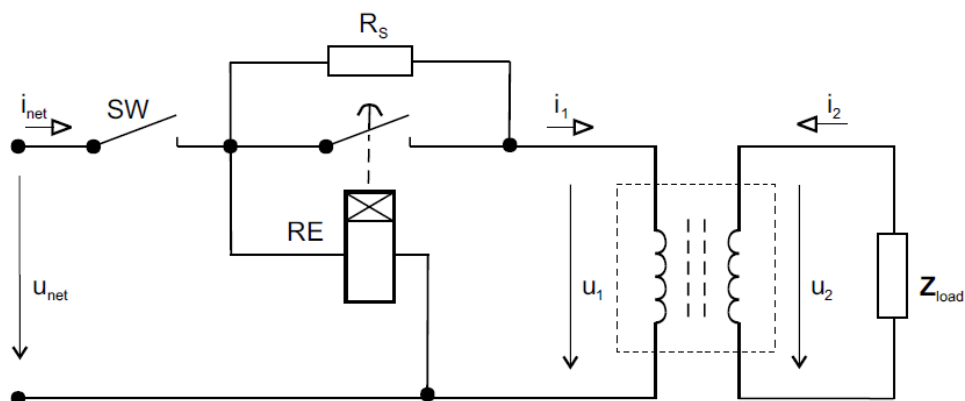
Tento přechodový jev se může objevit i v případech krátkodobého výpadku napájení, hrozí výskyt nadproudů. Nadproud může způsobit vybavení jistícího prvku, rušit okolní elektronická zařízení. Hledání optimálního řešení na potlačení tohoto jevu je namístě. Existují tři metody pro omezení zapínacího proudu transformátoru

- Snížením pracovní indukce
- Snížením remanence
- Připojení ve vhodném úhlu

Snížení pracovní indukce a připojení ve vhodném pracovním úhlu je náročnější na realizaci oproti řešení snížením remanence, kde nejsou kladeny tak vysoké nároky na elektroniku či technické zpracování jádra transformátoru.

Při zvýšení impedance primárního obvodu transformátoru se přímo neomezuje přechodový jev, ale impedance brání nárůstu zapínacího proudu tak, že snižuje elektromotrické napětí a tím pracovní indukci, jak uvádí Novák [10] v disertační práci, či v článku Gladstone [13].

Zvýšením impedance primárního vinutí má za následek zvýšení ztrát. Zapínací proud trvá řádově milisekundy. Použití výkonového rezistoru na okamžik sepnutí transformátoru je zřejmé, pro krátký okamžik při přimykání transformátoru omezí zapínací proud. Je to nejběžnější způsob řešení v praxi. Touto problematikou se zabývá mnoho kolegů ve vývoji, pro naši práci budeme vycházet z článku Panthala [19]. Transformátor je v první fázi připojen přes sériově zařazený rezistor, který omezuje velikost odebíraného proudu. Po odeznění přechodového jevu relé sepne a přimkne se transformátor přímo k síti. V tento okamžik vznikne druhotný přechodový jev, mnohonásobně nižší než zapínací proud transformátoru bez ošetření proti zapínacímu proudu.

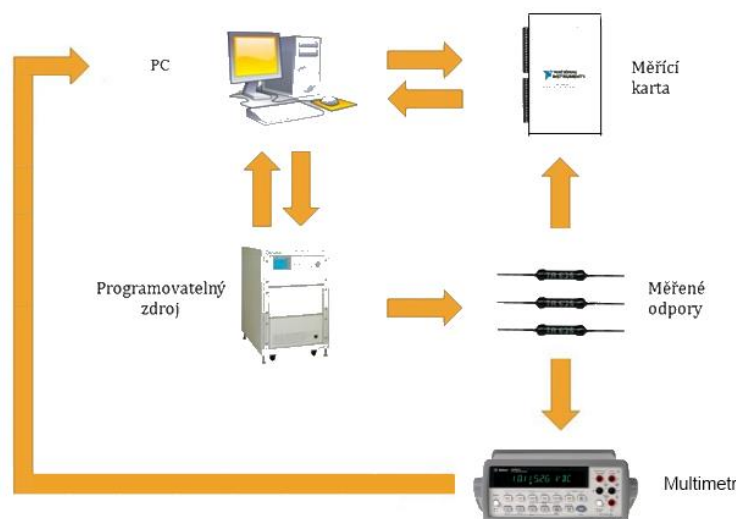


Obr. 9: Schéma stupňového spouštěče [10]

3. Experimentální měření

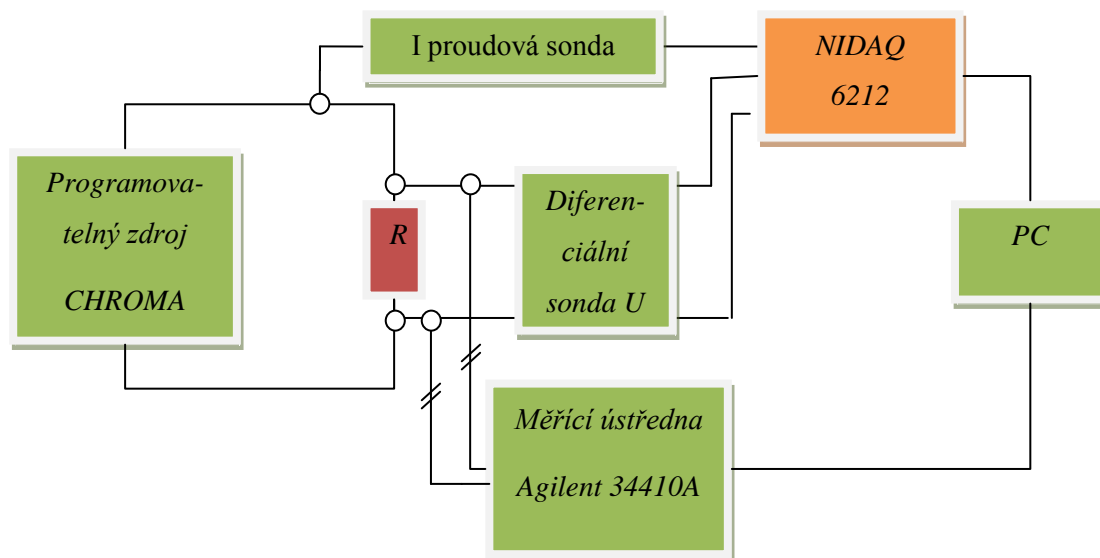
3.1 Návrh měřicího obvodu

Měřicí ústrojí se skládá z pěti celků: měřicí karta, úložiště a ovládací člen počítač, programovatelný zdroj, analyzátor a měřené odpory. Propojením těchto prvků získáme automatizovanou stanici pro měření impulsní charakteristiky výkonových rezistorů. Jak je graficky zpracováno v blokovém schématu na obr. 10.



Obr. 10: Schematické znázornění měřicí aparatury

Pro nezávislé měření odporu je použita měřicí ústředna, která zaručuje přesné měření elektrického odporu. Klasickou metodou měření elektrického odporu (dvou vodičově/čtyř vodičově) nedosáhneme takto přesných výsledků oproti měřicí ústředně, navíc propojení s PC se značně zautomatizuje proces měření. Doprovodně je měřeno na každém rezistoru napětí a proud ve formě oscilogramů pro případnou analýzu hoření oblouk při destrukci rezistoru.



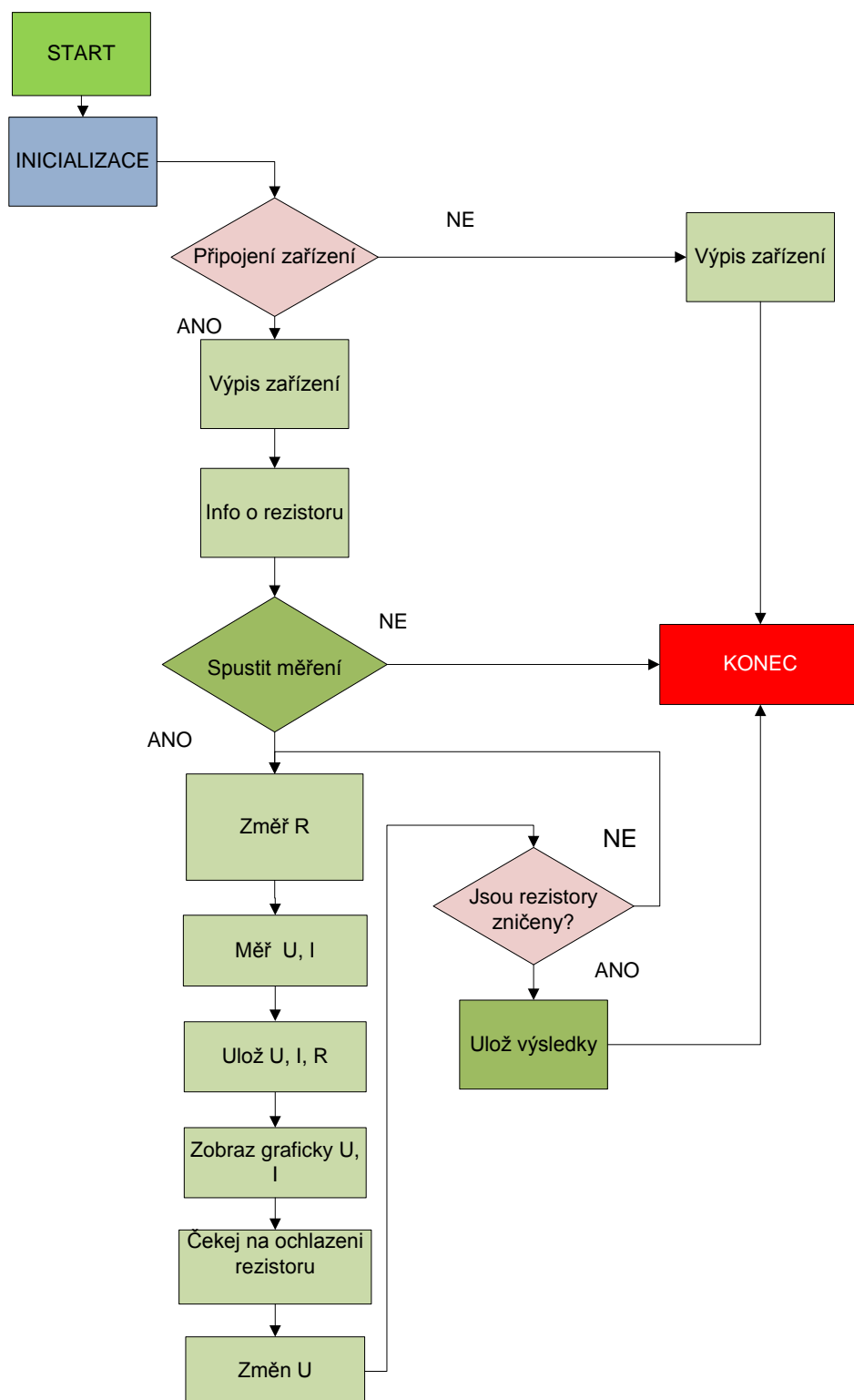
Obr. 11: Realizace zapojení dle blokového schématu (Obr. 10.)

Programovatelný zdroj nám poskytne možnost přesně nadefinovat délku a energii impulsu. Ovládací program a analýza naměřených dat je vytvořena v prostředí Matlab. Bližší pohled na programovou strukturu je na blokovém schématu na obr. 12.

Použité přístroje k sestavení měřicí stanice byly následující:

Tab. 3: Použité přístroje

Použití	Název	Počet
Zdroj	Chroma 61705	1 ks
Proudová sonda	Haweg HZ56-2	6x
Proudová sonda	Fluke I30s	2x
Terminál	Nidaq terminal	1x
Měřicí karta	Nidaq 6212	1x
Ústředna	HP Agilent 34970A	1x
Kelvinovy svorky	Upravené Kelvinovy svorky	16x



Obr. 12: Blokové schéma programu měření



Obr. 13: Zhotovená měřicí stanice

Měření probíhalo na následujících rezistorech:

Tab. 4: Měřené rezistory- specifikace výrobce

Měřené běžné výkonové rezistory						
Název	Označení	Výrobce	Odpor	Výkon	Typ	Cena*
AX5W-82R	Royal283	Royal Ohm	82 Ω	5 W	Metal-oxide	4,42 Kč
AX5W 82R	GES053	Hitano E. C.	82 Ω	5 W	Drátový - vinutý	4,42 Kč
CRL5W-4R7	CLR5W	SR Passive	4,7 Ω	5 W	Drátový - vinutý	2,12 Kč
AX5W-4R7	Royal321	Royal Ohm	4,7 Ω	5 W	Drátový - vinutý	3,03 Kč

*Cena je vztažena k www.tme.eu k datu 24. 4. 2013

Rezistory se zatěžovaly pulsem o délce $L = 5 \text{ ms}$ s postupně vzrůstající energií až do destrukce rezistoru. Tento puls představuje minimální čas potřebný pro omezení rozběhového proudu indukčních strojů, kdy se částečně natočí myšlené magnetické domény ve směru působícího proudu a omezí tím proudový ráz.

Měření probíhá vždy na osmi kusech rezistorů následovně:

1. Informativní měření 50 cyklů

Na základě tohoto měření se zjistí při jaké energii dochází k poškození rezistoru a k destrukci rezistoru.

2. Určovací měření 250 cyklů

Zaměřeno na specifický úsek měřené oblasti impulsní přetížitelnosti. Slouží pro ověření informativního měření stálosti výsledků dané sady rezistorů – energii pro jednoznačné určení mezí kdy dochází k nevratnému poškození a destrukci rezistoru.

3. Ověřovací měření

Měření pro určení stálosti výsledku. Odvíjí se od předchozích dvou měření, zda postačí k určení mezí přetížitelnosti.

Podmínky měření byly vždy stejné. Teplota v místnosti byla 21°C. Jednalo se o laboratoř s konstantním prostředím (budova A, laboratoř EL3, TUL).

3.2 Výsledky experimentu

Stručný přehled odolnosti měřených rezistorů ukazuje následující tabulka:

Tab. 5: Průběh měření s nastavenými kroky pro jednotlivé rezistory

Druh	Název	Cyklů	Energie [J]			Napětí [V]	
			Krok	Od	Do	Od	Do
Metal-oxide	Royal283_82R_5w_01	50	0,1	0,1	4,6	44,7	279
	Royal283_82R_5w_02	250	0,1	0,1	4	44,7	257
	Royal283_82R_5w_03	1000	0,1	3,2	3,6	228	245
Vinutý	GES053_82R_5W_01	50	0,15	0,1	9	44,7	385
	GES053_82R_5W_02	250	0,35	1,8	5,5	44,7	380
Vinutý	CLR5W_4R7_5W_01	50	2,15	2,1	19,2	44,7	134
	CLR5W_4R7_5W_02	50	1,1	2,1	19,2	44,7	134
	CLR5W_4R7_5W_03	250	2,15	2,1	19,1	44,7	134
vinutý							
	Royal321_4R7_5W_01	250	2,15	2,1	28,7	44,7	167

Z Tab. 5 je patrné, že metal-oxidové rezistory mají menší (poloviční) odolnost vůči energii impulsu, než je tomu u vinutých rezistorů se stejnými hodnotami. Princip proč tomu tak je si řekneme o něco později.

Podíváme-li se na vývoj odporu v závislosti na pulzech (Obr. 14), dostaneme jasný přehled o tom, jaké velikosti energie trvale poškozují rezistor a kdy dochází k překonání vnitřních vazeb – destrukce rezistoru. Vnitřní vazba je závislá na mnoha faktorech: teplota (narušení vnitřní struktury), mechanické napětí (jedná-li se o vinutý drát), okolní prostředí, nehomogenity v odporovém materiálu, apod.

3.3 Oblast poškození rezistoru

Mechanismus destrukce u vinutých rezistoru spočívá v natavení odporového drátu. Teplota drátu dosáhne bodu tání a při tom dojde k zahoření oblouku a rozpojení kontaktního místa. U metal-oxidů je princip destrukce jiný. Metal-oxidová vrstva se zničí vlivem překonání proudové pevnosti v nejslabším místě MO vrstvy.

Určení přesného okamžiku kdy se odporová vrstva začne nezvratně měnit je obtížné. Obecně metal-oxidové rezistory se prokazatelně chovají stabilně, díky své struktuře a vysoké homogenitě odporové vrstvy (díky technologii výroby je zaručena vysoká čistota metal-oxidu – napařováním¹).

U vinutých rezistorů nelze zaručit stoprocentní čistotu použitého drátu. Už samotný proces výroby odporových materiálů je složitý, zanesení nečistot či obsah nečistot v kovech se běžně vyskytuje. U dostupných rezistorů kvalita použitých materiálů je nesrovnatelná se speciálními rezistory, které mají zaručené vlastnosti a chování ve specifických podmínkách.

Impulsní charakteristiky sady odporu 82R 5W jsou zobrazeny na obr. 14 a obr. 18. Jedná se o dvě různé technologie odporového tělesa (metal-oxid/odporový drát). Na první pohled je patrné že metal-oxidové rezistory se pro impulsní charakter zátěže nehodí. Sice prokazují stabilitu el. odporu, blížíci se počáteční hodnotě odporu před začátkem měření impulsní charakteristiky. To však není údaj, který zkoumáme. Zajímá nás hodnota energie, která způsobí trvalé poškození rezistoru a jejich maximální výkon který dokáže pojmout. Dle TME [20] se na trhu nabízí rezistory metal-oxidové jen do výkonů 5 W, kdežto zastoupení vinutých (drátových) rezistorů je do 1000 W. Proto použití metal-oxidových rezistorů se u náročných aplikací zatím neuvažuje.

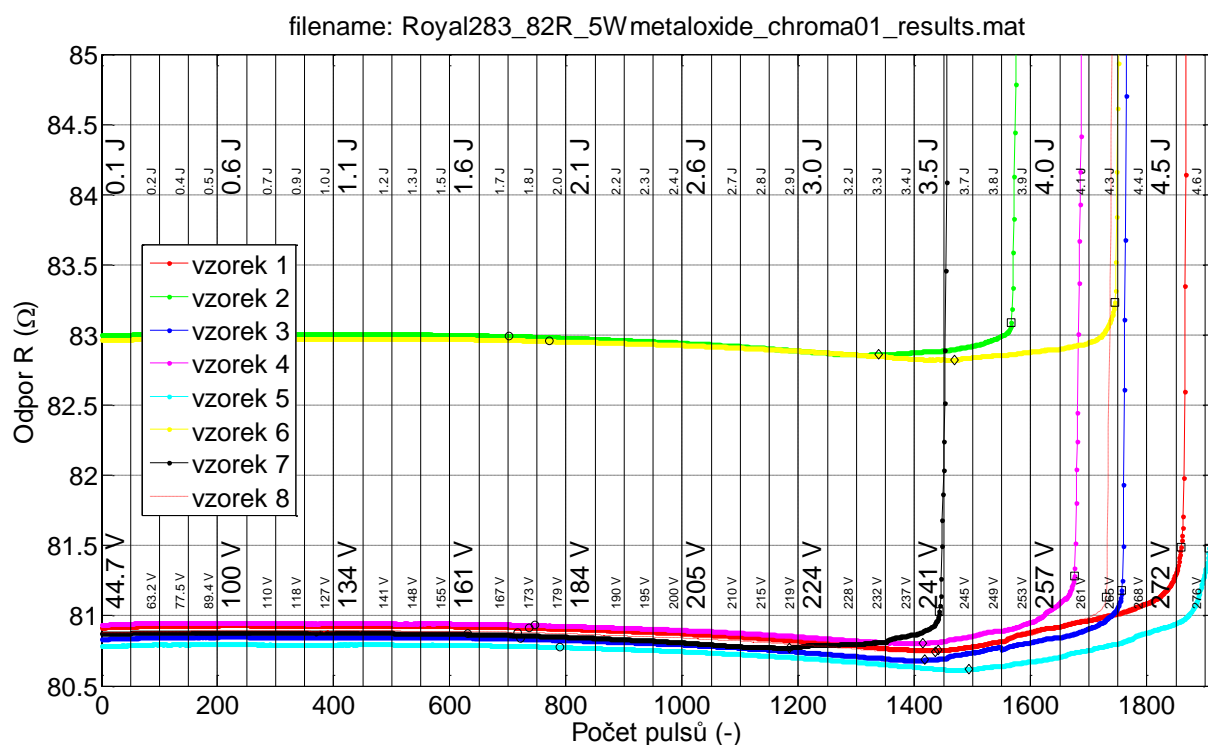
¹ Blíží informace o přesném výrobním procesu nanášení metal-oxidové vrstvy na keramické tělísko rezistoru je na stránce <http://www.resistorguide.com/metal-oxide-film-resistor/>

*Kromě uvedených citací bylo čerpáno ze zdrojů k objasnění možných příčin poškození rezistoru [3] a [5]

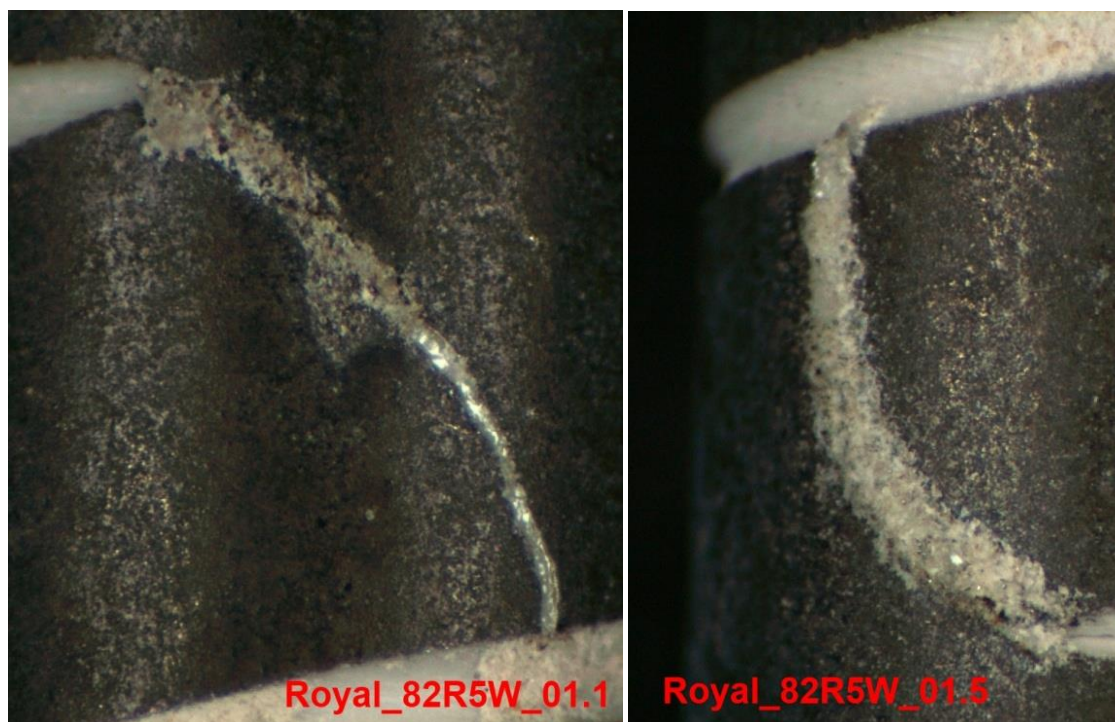
3.3.1 Oblast poškození metal-oxidových rezistorů

Royal ohm AX5W-82R (Royal283)

U metal-oxidů je identifikace meze přetížitelnosti = meze kdy dochází k nevratným změnám snazší, než je tomu u vinutých rezistorů. Obr. 14. je ideálem pro přesné určení mezí, které charakterizují místa nevratných změn v odporové vrstvě. Ve své podstatě se jedná o inflexní bod impulsní charakteristiky, kde dochází k prvnímu narušení metal-oxidu. V tento okamžik se část povrchových atomů odporové vrstvy začne vlivem dostatečně velké energie rozptylovat do okolí, jedná se o tzv. difuzi [21]. Dle Nováka [17], při přetížení nejprve dochází k redukci oxidu na kov. Díky tomu dojde k mírnému poklesu odporu. Při delším přetěžování dochází k natavení odporové vrstvy nebo prasklinám a natavení ve vrstvě keramického nosiče nebo povlaku rezistoru až do přerušení odporové vrstvy.



Obr. 14: Impulsní charakteristika Royal ohm (Royal283), 82 Ω, 5W metal-oxide, sada 01



Obr. 15: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů Royal ohm (Royal283), 82R, 5W (0x – sada, 01.x – první rezistor ze sady 01)

Destrukce proběhla vždy v místě, kde začíná trimrovací drážka (u kontaktní čepičky). Drážka rezistoru byla evidentně vytvořena mechanickou cestou – drážkování, po obvodu drážky jsou evidentní rýhy způsobené frézovacím nástrojem. Z této úvahy je zřejmé, že nejslabší místo v rezistivní vrstvě je právě začátek trimrovací drážky. Nástroj pro trimrování rezistoru evidentně klade moc velký tlak na odporovou vrstvu a při kontaktu s metal-oxidem jej naruší – vytvoří mikrotrhliny. Při vyšší energii se toto narušení prohlubuje až do doby, kdy dojde k zapálení oblouku a destrukci rezistoru.

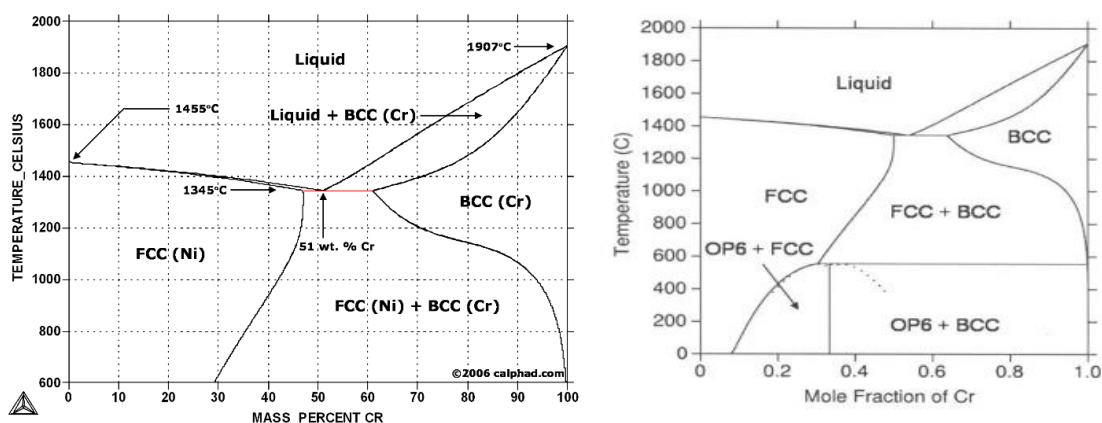
3.3.2 Oblast poškození vinutých rezistorů

HITANO ENT. CORP. AX5W 82R (GES053)

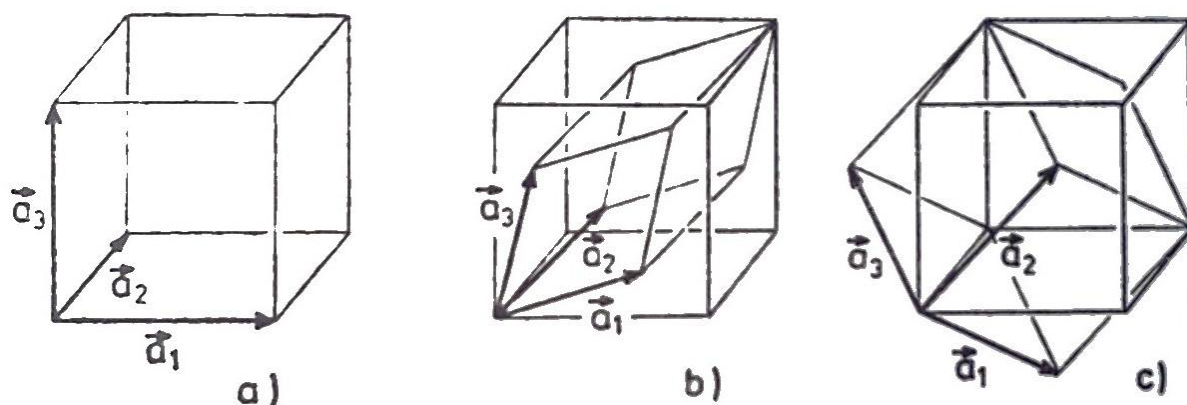
U impulsní charakteristiky vinutého rezistoru GES 82R 5W (Obr. 18) určení meze není tak jednoznačné, jak tomu je u metal-oxidových rezistorů. Difuze u těchto vinutých rezistorů není zásadním degradujícím mechanismem. Zde se uplatní degradace vlivem teploty, která zapříčiní rekrytalizaci mřížky – změna fáze – a tím související změna velikosti zrn [22].

Změna fáze spočívá v přeměně krystalové struktury slitiny. Slitina má strukturu prolínajících se krystalových mřížek a je uzpůsobena dle fázového diagramu na Obr. 16 se strukturou mřížky uvedenou na Obr. 17 (vztaženo k nejpoužívanějšímu materiálu Nichromu v poměrech Ni = 80% a Cr = 20%*). Rekrytalizace probíhá při teplotě 500°C dle Obr. 17 a pak při teplotě tání 1400°C.

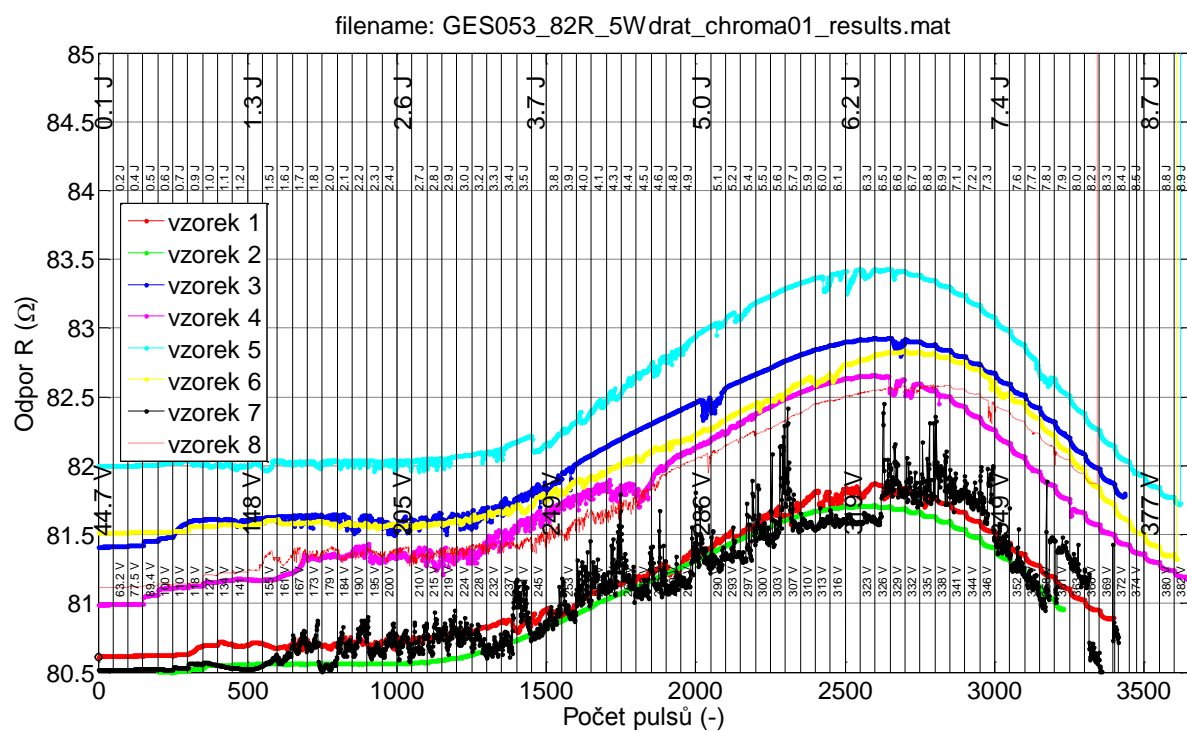
Působením vysoké energie ve formě pulsu se krystalová mřížka mění. Materiály z kterých je odporový drát tvořen ztrácí své původní vlastnosti a tím mění elektrický odpor. Vezmeme-li nejpoužívanější materiál pro vinuté rezistory Nichrom, jeho fázový diagram obr. 16 a bližší pohled na destrukci zničené místo rezistoru pod mikroskopem nám pomůže odhalit, jaký mechanismus poškozování předchází destrukci v odporovém drátu.



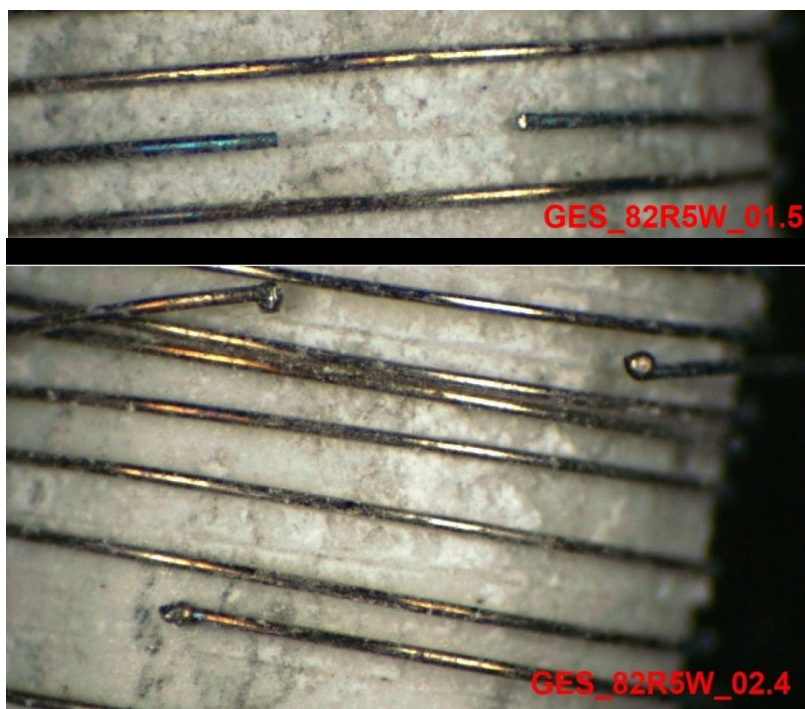
Obr. 16: Fázový (binární) diagram Ni-Cr [23] vlevo naměřený, vpravo modelový od počáteční teploty dle Chana [26]



Obr. 17: Krystalové struktury (fáze) mřížek [27]: a) prosté kubické, b) kubické plošně centrované (FCC - α), c) kubické prostorově centrované (BCC - β)



Obr. 18: Impulsní charakteristika Hitano E. C. (Ges053), 82 Ω, 5W vinutý, sada 01



Obr. 19: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů Hitano E. C. (GES053) 82R 5W

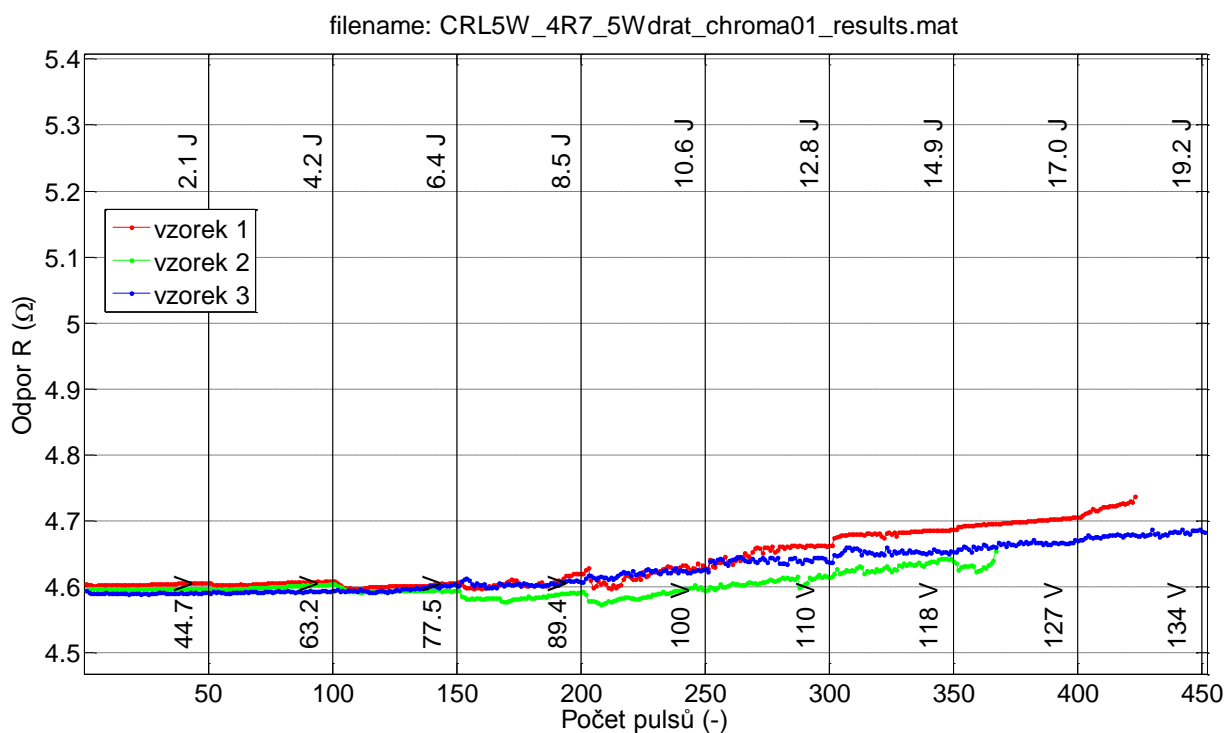
Z bližšího pohledu na Obr. 19 dojdeme k závěru, že drát není zcela homogenně zatěžován. Pomineme-li mechanické napětí vyvíjené způsobem uložení, nejvíce nám el. odpor ovlivní teplota a nečistoty v použitém odporovém drátu. Dokladem nehomogenit v použitém odporovém drátu je na Obr. 19 u GES_82R5W_02.4, kde došlo k porušení na dvou místech zároveň a skutečnost zabarvení drátu, která není konzistentní po celé délce vodiče.

Zanedbáme-li tyto nehomogenity a porovnáme výsledný průběh s fázovým diagramem Ni-Cr ve své podstatě si odpovídají. Vztáhneme-li energii destrukce rezistoru k 8,7 J, při které byla dosažena teplota tání odporového drátu, poměrově určíme místo změn vlastností materiálu – změny fáze. Dojdeme k závěru, že v první třetině impulsní charakteristiky (odpovídající 0°C – 500°C v binárním grafu Ni-Cr) došlo k výrazné změně el. odporu.

**Bohužel z neznalosti materiálu použitého na výrobu odporového drátu uvažujeme běžně používaný Nichrom, který dle fázového diagramu odpovídá průběhu impulsní charakteristiky. Výrobci rezistorů přesné složení materiálů, z kterých jsou vytvořeny odporové dráty, tají.*

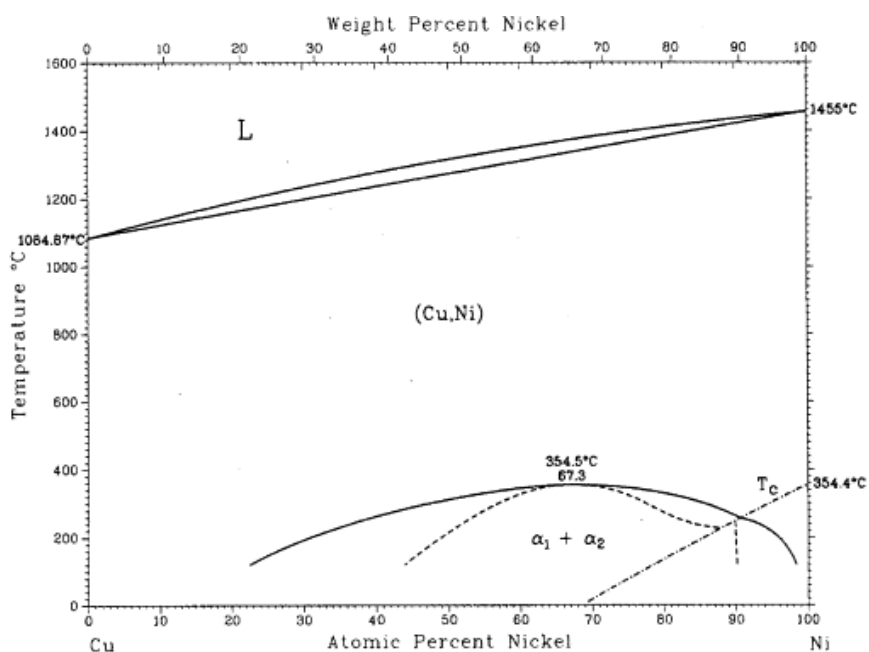
SR Passive CRL5W-4R7 (CLR5W)

Impulsní charakteristika CRL 4R7 5W je jiná než u GES 82R 5W. Důvodem by mohl být použitý jiný materiál (zřejmě konstantan – Cu-Ni) pro odporový element dle impulsní charakteristiky.



Obr. 20: Impulsní charakteristika SR Passive (CLR5W), 4,7 Ω, 5W drátový

Na první pohled vývoj el. odporu se od GES_82R5W liší. Neobsahuje výrazný nárůst hodnoty el. odporu mezi bodem nezvratných změn a destrukci rezistoru, který by odpovídal výrazné přeměny krystalové struktury odporového drátu. Vývoj el. odporu je u této sady mnohem stálejší.



Obr. 21: Cu-Ni fázový diagram [29]



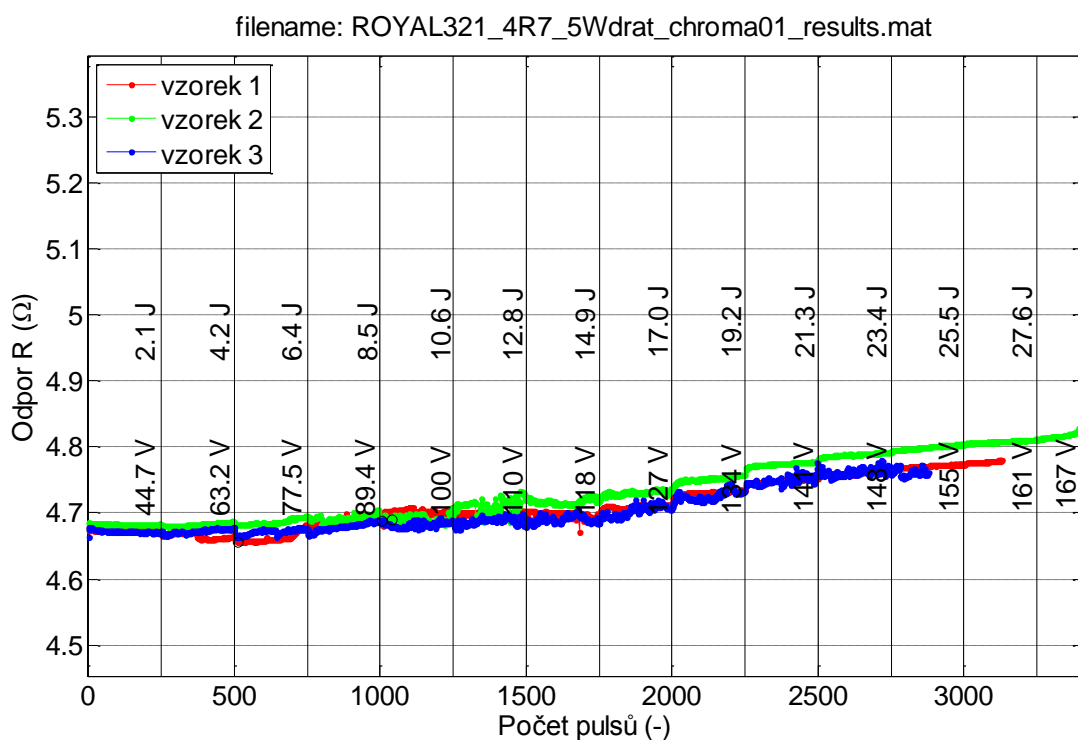
Obr. 22: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů SR Passive (CLR5W) 4R7 5W

Na bližší pohled je zabarvení odporového drátu z větší části stejné, až na závit kde došlo k rozpojení. To znamená přibližně stejnou teplotu v celém odporovém elementu, až na závit, kde byla teplota vlivem zapálení oblouku větší.

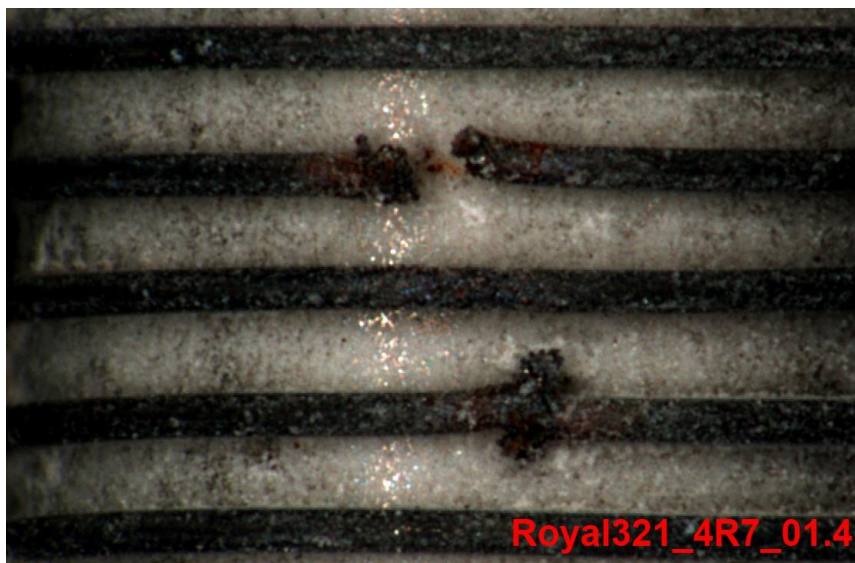
Oproti sadě GES 82R 5W není zde výskyt nečistot tak markantní. Také může hrát větší průřez použitého drátu. Je-li průřez drátu dostatečně velký, nehomogenity v použitém materiálu se nijak zvlášť výrazně neprojeví. Jejich relativní obsah v průřezu se s dostatečným průřezem drátu snižuje.

Royal ohm AX5W-4R7 (Royal321)

Royal321 4R7 5W se chová při pulsním zatěžování obdobně jako CRL 4R7 5W od firmy SR Passive. Je zřejmé, že použité materiály se přibližně shodují.



Obr. 23: Impulsní charakteristika Royal ohm (Royal321), 4,7 Ω, 5W drátový



Obr. 24: Pohled pod mikroskopem na místo destrukce odporů Royal ohm (Royal321) 4R7 5W

3.4 Spektrografie měřených drátových rezistorů

Z neznalosti materiálů použitých k výrobě odporových drátů u použitých rezistorů a neochoty výrobců, sdělit přesné složení, byla provedena spektrální analýza drátových rezistorů (v příloženém CD-ROM) na zařízení Zeiss Supra FE-SEMs Plus.

Tab. 6: Procentuální zastoupení elementárních prvků v odporových drátech měřených rezistorů určené spektrometrem Zeiss Supra FE-SEMs

Výrobce	Odpor. sada	P _N [W]	Cu [%Wt]	Ni [%Wt]	Cr [%Wt]	Mn [%Wt]	O [%Wt]
Hitano E. C.	82R	5	-	78,7	20,2	-	-
Royal Ohm	4R7	5	53,8	44,3	-	1,4	-
Sr Passive	4R7	5	58,7	39,6	-	1,3	-
	4R7 (destr.)	5	9	44,7	-	16,2	25,6

*%Wt – procento hmotnostního zastoupení ve vzorku

Orientační určení materiálu z impulsní charakteristiky se potvrdilo jako správné. Sada Royal ohm GES 82R 5W (GES053) používá odporový drát z Nichromu (Ni-Cr v poměru 80:20). Sady SR Passive CRL5W-4R7 (CLR5W) a Royal ohm AX5W-4R7 (Royal321) obsahují konstantanový drát (Cu-Ni-Mn, v přibližně stejných poměrech 54:45:1).

Pro přesné určení tloušťky odporového drátu byl použit elektronový mikroskop. Tloušťka závitu byla určena posuvným měřidlem. Závity jsou volně navinuty na keramické tělísko s vůlí, proto výsledky jsou pouze orientační.

Tab. 7: Fyzické parametry měřených drátových rezistorů

Výrobce	Odpor. sada	P _N [W]	d _{drat} [μm]	S _{drat} [μm ²]	d _{trub.} [mm]	o _{zav} [mm]	závitů [-]	l _{drat} [mm]
Hitano E. C.	82R	5	80	5020	4,15	13,1	30	391
Royal Ohm	4R7	5	160	20110	4,35	13,7	14	191
Sr Passive	4R7	5	160	20110	4,35	13,7	14	191

Teplota odporového drátu byla určena z fyzikálních parametrů sad rezistorů následovně: Energie pulsu lze považovat za energii tepelnou, jelikož rezistor přijímá pouze energii z pulsu. Neuvažujeme okolní prostředí, za dobu pulsu 5 ms se nestihne předat tepelná energie do okolních materiálů. Zkoumáme, na jako teoretickou teplotu se odporový element zahřál.

$$W = Q = c \cdot m \cdot \Delta\vartheta = c \cdot m \cdot (\vartheta_0 - \vartheta). \quad (54)$$

Kde c měrná tepelná kapacita materiálu

Elementární úpravou vztahu pro hustotu $\rho = m/V$ dostaneme

$$m = \rho \cdot V = \rho \cdot l \cdot S = \rho \cdot l \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}. \quad (55)$$

Dosazením (55) do rovnice (54) dostaneme

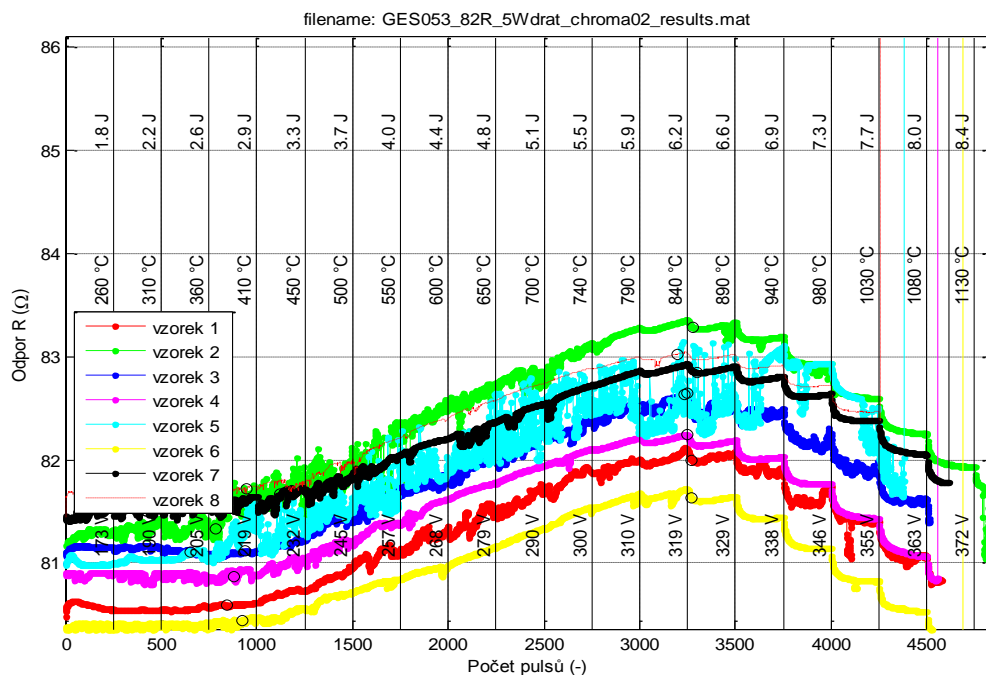
$$W = c \cdot m \cdot (\vartheta_0 - \vartheta) = c \cdot \rho \cdot l \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot (\vartheta_0 - \vartheta). \quad (56)$$

Vyjádřením zkoumané teploty ϑ získáme rovnici pro určení teoreticky dosažené teploty odporového drátu v absolutních hodnotách

$$\vartheta_{teor} = \frac{W}{c \cdot \rho \cdot l \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}} + \vartheta_0. \quad (57)$$

3.4.1 Porovnání tepelného zatížení odporového elementu s impulsní charakteristikou

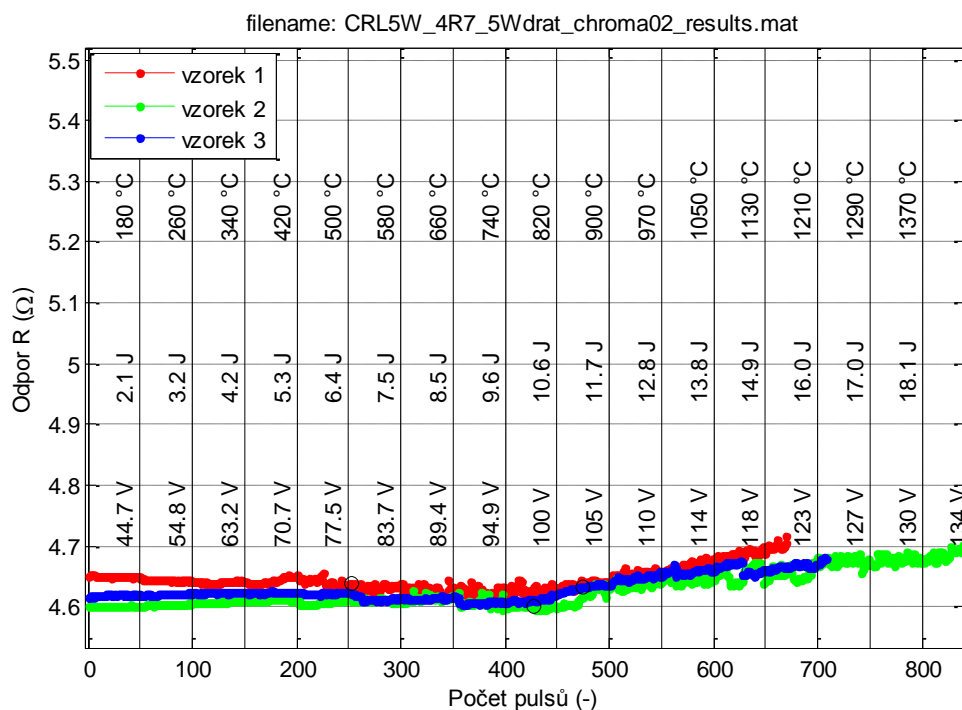
Dle vztahu (57) a impulsních charakteristik jsme schopni určit, jaké teplotě byl odporový drát vystaven (veškeré grafy v příloženém CD-ROM).



Obr. 25: Graf tepelného zatížení vinutých rezistoru GES 82R 5W při impulsní zkoušce

Porovnáním Obr. 25 a binárního grafu Ni-Cr, uvedeném na Obr. 16, je evidentní že vývoj el. odporu při pulsním zatížení souvisí s binární charakteristikou použitého materiálu. V oblasti 400 °C přechází kov z fáze OP6 + FCC na fázi FCC [30]. V důsledku tohoto jevu se začne měnit vnitřní struktura odporového materiálu – rekrytalizace. Důsledkem této rekrytalizace je změna vodivosti, avšak nejedná se o rychlý jev (naseví je tomu i postupný vzrůst el. odporu). Dle Rolletta [31], úplná rekrytalizace nastává až po několika hodinách, odvíjí se od teploty a doby, které byl materiál vystaven.

Tepelné zatížení sady rezistor 4R7, kde odporový drát je z konstantanu je zobrazen na Obr. 26.



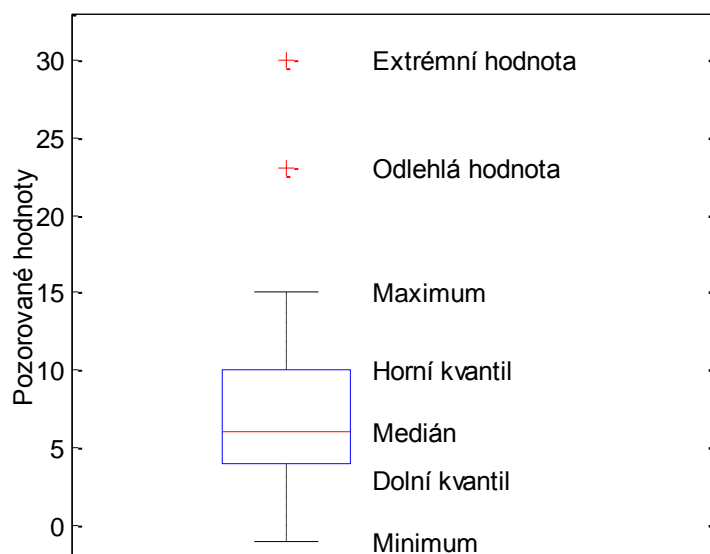
Obr. 26: Graf tepelného zatížení vin. rezistoru 4R7 5W při impulsní zkoušce

Porovnáním Obr. 26 s fázovým diagramem na Obr. 21, je patrné že souvislost s vývojem el. odporu v oblasti 320 °C souvisí. U této teploty dochází ke změně fáze odporového materiálu z FCC₁ + FCC₂ ($\alpha_1 + \alpha_2$) na strukturu FCC (α). Rekrystalizace se začíná projevovat do průběhu el. odporu v impulsní charakteristice.

4. Statistické vyhodnocení meze přetížitelnosti

Pro statistické vyhodnocení je použit standardní krabicový graf (boxplot) [28].

Krabicový diagram nám umožňuje posoudit symetrii a variabilitu, existenci extrémních hodnot námi pozorovaných veličin. Na Obr. 27 je zobrazeno, jak takový diagram vypadá a co značí jednotlivé symboly.



Obr. 27: Krabicový graf – legenda

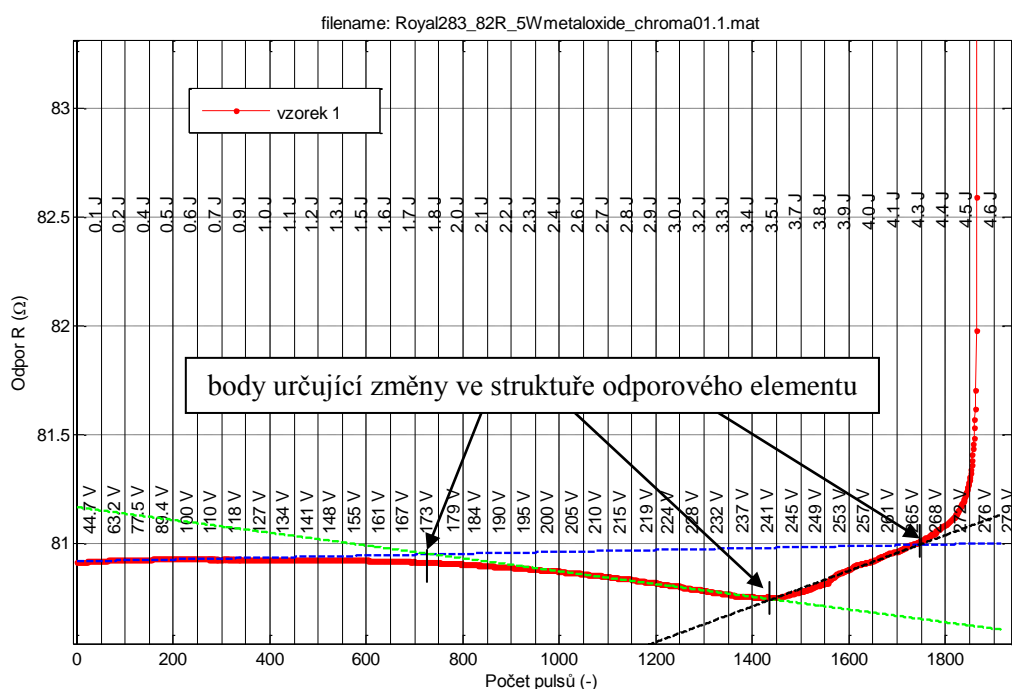
Nejdůležitějším kvantifikátorem krabicového diagramu je medián. Tento kvantil představuje míru optimálně voleného „středu“ pozorované veličiny, bez ovlivnění extrémními hodnotami. Určuje optimální míru posouzení sledovaných dat.

Pro uplatnění boxplotu je nutné určit hodnoty elektrického odporu, kdy nastane nevratné poškození.

Z naměřených impulsních charakteristik se určily body, které se dále staticky vyhodnotí pro kvantitativní určení bezpečné meze přetížitelnosti měřených rezistorů.

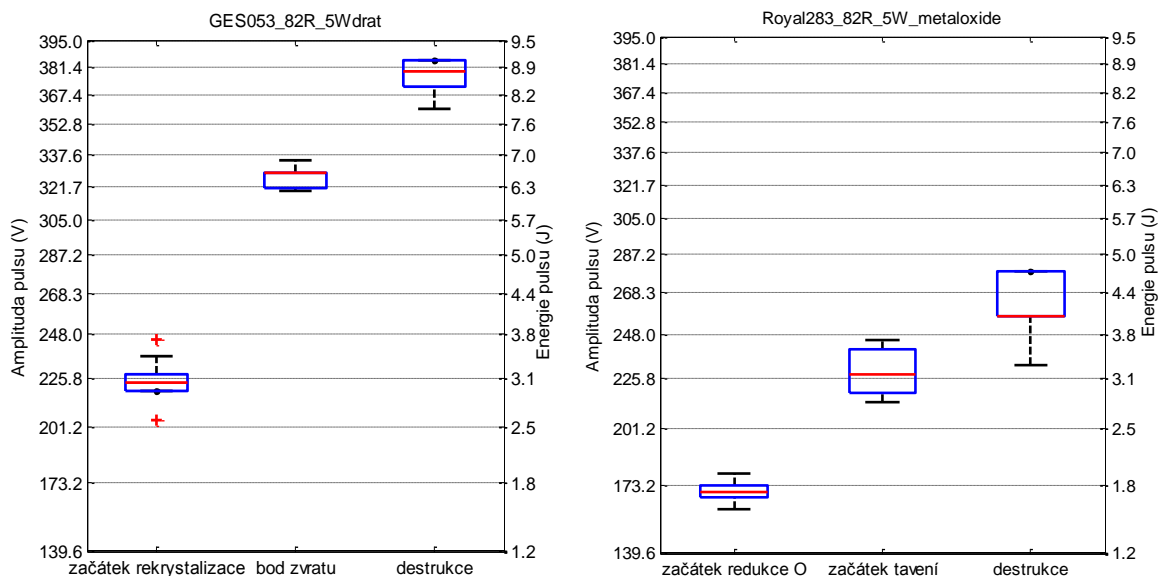
Bylo postupováno následovně: Při malé energii se vývoj el. odporu v rezistoru vyvíjí téměř lineárně. Aproximujeme počáteční stav lineární křivkou (viz. Obr. 28). Pro vzrůstající energii pulsu se vývoj el. odporu mění na průběh exponenciální, vlivem vnitřních změn – degradace odporového materiálu. Avšak pro každý materiál platí různé degradační mechanismy (popsáno v kapitole 3.3), které způsobí rozdílné vývoje el. odporu při zatěžování pulsy.

Body, kde dochází k protnutí regresních křivek určuje místo zásadních změn ve vývoji el. odporu.

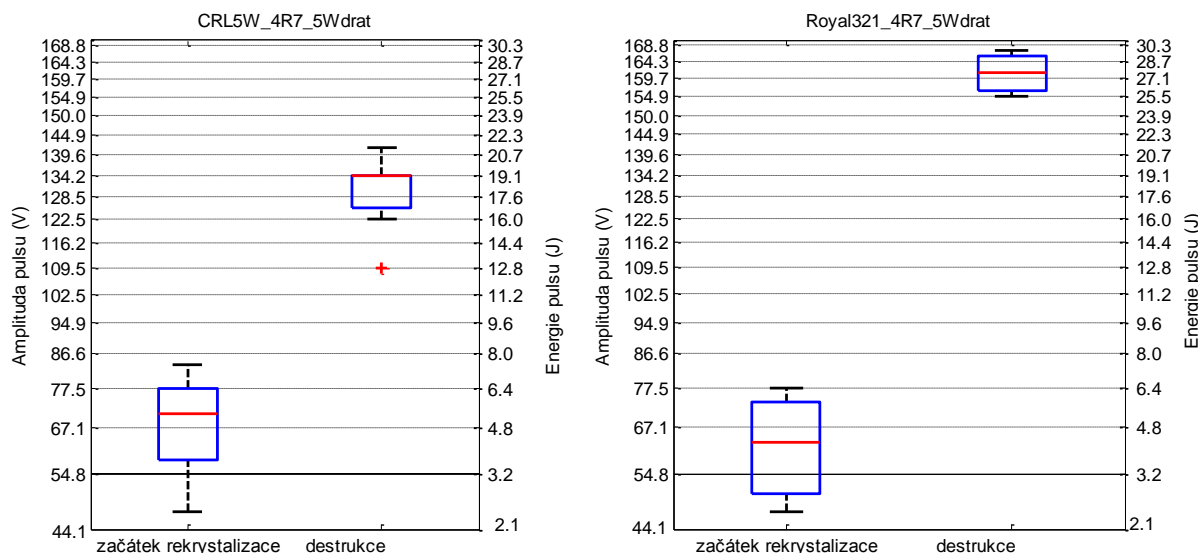


Obr. 28: Impulsní charakteristika – určení místa nevratné degradace rezistivního elementu

4.1 Krabicový diagram meze přetžitelnosti rezistorů



Obr. 29: Krabicový diagram rezistorů 82R 5W, vlevo – drátový (Ges053), vpravo – metal-oxidový rezistor (Royal283)



Obr. 30: Krabicový diagram rezistorů 4R7 5W, vlevo – drátový SR Passive (CLR5W), vpravo – drátový Royal ohm (Royal321)

4.2 Rekapitulace statistických výsledků experimentu

V následující tabulce (Tab. 8) je shrnující přehled hodnot, určující objektivní mez přetížitelnosti – na jaké maximální parametry lze měřené sady rezistorů zatížit (vztaheno k délce pulsu 5 ms). Tzn., na jaké maximální napětí (U_{max}), maximální výkon (P_{max}), maximální energii (W_{max}) lze použít měřené sady rezistorů, aniž by docházelo k nezvratným změnám v odporovém elementu. Pro metal-oxidové rezistory to představuje bod „redukce O“ a pro vinuté „začátek rekrystalizace“. Ostatní body představují další změny struktury odporového materiálu (tavení, bod zvratu a destrukce rezistoru).

Tab. 8: Rekapitulace statistických výsledků – mez přetížitelnosti (vztaheno k délce pulsu 5 ms)

Sada				Median				
Výrobce	Sada	Odpor	P_N [W]	U_{max} [V]	W_{max} [J]	P_{max} [W]	P_{max}/P_N [-]	$\vartheta_{teor.}$ [°C]
Royal Ohm	Royal283	82R	5W	170 V	1,8	350	70	-
Hitano E.C.	Ges053	82R	5W	225 V	3,0	610	120	430
SR Passive	CLR	4R7	5W	95 V	5	1000	200	410
Royal Ohm	Royal321	4R7	5W	100 V	4,7	940	190	380

* P_{max}/P_N – označuje, o jaký maximální násobek jmenovitého výkonu, lze rezistor zatížit, T_{teor} – značí, jaké maximální teploty dosáhne odporový drát při pulsním zatížení maximální energií po dobu 5 ms

Porovnáme-li vyhodnocení naměřených dat s daty rezistorů, u kterých výrobce udává impulsní přetížitelnost pro stejné podmínky, kterými zatěžíme měřené rezistory (Tab. 9) a lze porovnat výsledky experimentu.

Tab. 9: Rezistory určené pro pulsní charakter zátěže, stejné podmínky jako u experimentu (katalogové hodnoty pro délku pulsu 5 ms)

Název	Výrobce	Odpor	P_N [W]	Typ	Cena (kus)	P_{max} [W]	P_{max}/P_N [-]
AC050...04708JACO	VISHAY DRALORIC	4R7	5	Drátový	14,61 Kč	1400	280
AC050...04708JACO	VISHAY DRALORIC	82R	5	Drátový	13,64 Kč	1000	200

*data z www.cz.farnell.com k datu 28. 4. 2013

Porovnáním výsledků experimentů se speciálními rezistory určenými k pulsnímu přetěžování jsme dospěli k podobným výsledkům.



Mez maximální zatížitelnosti měřených rezistorů se jmenovitou hodnotou 82R je nižší, než je tomu u speciálních. Měřené rezistory 4R7 vykazují stejnou mez přetížitelnosti vzhledem k délce pulsu stejně jako ty speciální.

Srovnáním pořizovacích nákladů měřených rezistorů (Tab. 4) a speciálních rezistorů (Tab. 9), dojdeme k závěru, že měřené rezistory jsou až o 200% levnější než speciální. Použití těchto rezistorů ušetří pořizovací náklady bez nutnosti poddimenzovat zařízení.

5. Shrnutí dosažených výsledků

Ze statistických výpočtů sady Royal286 (Royal Ohm, AX5W-82R) vyplývá, že 5 W filmový rezistor lze při délce impulsu 5 ms poddimenzovat až 70krát (350 W), aniž by došlo k nevratnému poškození rezistoru.

Nečekaným objevem byla pozice destrukce rezistoru. Vždy se nacházela na stejném místě – začátek frézovací drážky. Předpokládaná pozice destrukce rezistoru byl střed odporové vrstvy. Dle předpokladu, nejslabší místo u homogenních materiálů při zatížení elektrickým proudem je vždy v oblasti středu odporového elementu, vlivem větší koncentrace tepelné energie.

Naproti tomu nejslabší místo u měřené sady rezistorů je začátek trimrovací drážky. Mechanismus, který zapříčiní degradaci odporového prvku v tomto místě je s nejvyšší pravděpodobností způsobeno tlakem vyvíjeným nástrojem na odporovou vrstvu. Při zahájení procesu frézování – prvotního dotyku nástroje se vytvoří mikrotrhliny ve struktuře metal-oxidu, které se s postupně zvyšující energií pulsů (vlivem difuze – redukce kyslíku) prohlubuje do doby, kdy se překoná elektrická pevnost oxidu kovu a dojde k zapálení oblouku – destrukci rezistoru.

Vinuté rezistory z pohledu odolnosti na pulsní charakter zátěže se chovají odlišně od metal-oxidových rezistorů. Hlavním parametrem ovlivňující průběh el. odporu je použitý materiál, tzn. z jakých prvků se skládá. Znalost tohoto parametru určuje jakým způsobem bude ovlivněna vnitřní struktura odporového materiálu (strukturální změny) vlivem energie pulsu.

Sada rezistorů GES053 (Hitano E. C., AX5W 82R) lze, při délce zatěžovacích pulsů 5 ms, poddimenzovat až 120krát (610 W), aniž by došlo k trvalému poškození odporového drátu. Porovnáním se stejnou odporovou sadou Royal286 můžeme konstatovat, že metal-oxidy mají horší schopnost odolávat pulsům o větší energií. V číslech se jedná přibližně o poloviční odolnost.

Místa poškození u této sady rezistorů byla náhodná, vždy došlo k natavení závitu odporového drátu a následného k zapálení oblouku. Pozice destrukcí nenaznačovali, že by docházelo vlivem mechanických či jiných namáhání k centralizaci místa destrukce.



Sada rezistorů CLR5W (SR Passive, CRL5W-4R7) odolává pulsům délky 5 ms do energie 5 J bez trvalých změn. To znamená, že lze tuto sadu rezistorů poddimenzovat až 200krát (1000 W). Tyto hodnoty jsou stejné v porovnání se speciálními rezistory pro tento druh zátěže.

Sada rezistorů Royal321 (Royal Ohm, AX5W-4R7) se moc neliší od CLR5W. Dosažené výsledky jsou téměř shodné. Tuto sadu lze poddimenzovat až 190-krát (940 W) pro 5 ms pulsy.

6. Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout a zhotovit aparaturu pro měření přetížitelnosti výkonových rezistorů, určit bezpečnou mez metal-oxidových a vinutých rezistorů při opakovaných pulsech.

Metal-oxidové rezistory vzhledem k dostupnosti nižších výkonových řad (pouze do 5 W) neobsáhnou takové využití jako vinuté rezistory (výkonové řady až 1000 W). Proto metal-oxidové rezistory zatím neobsáhnou zatím škálu využití u náročnějších aplikací jako rezistory drátové.

Měřené sady rezistorů prokázali přibližně stejnou mez impulsní přetížitelnosti pro délku impulsu 5 ms jako u speciálních rezistorů, určených k impulsnímu charakteru zátěže. Avšak rezistory vyšších ohmických hodnot, především vinuté rezistory, jsou náchylnější na změnu el. odporu se stoupajícím zatížením.

Pro zpřesnění dosažených výsledků by bylo dobré provést mnoho dlouhodobých měření, která by obsáhla všechny energetické hladiny pulsů. Pro jednu hladinu energie nutnost prověřit stálost průběhu el. odporu pro několik tisíc pulsů. Optimalizace se předpokládá do budoucna.

Pro představu jedna sada rezistorů se měřila v průměru od 30 hodin do 200 hodin čistého času. Časová náročnost tohoto měření je zřejmá. Automatizací a multiplicitou měření více vzorků zároveň se proces měření výrazně urychlil a výrazně zefektivnil sběr dat. Využití zdroje (zapůjčené měřicí přístroje, programová podpora) pro sestavení měřicího pracoviště by se dali rozšířit i o další stanice, popř. nákupu výkonnějšího programovatelného zdroje, který by umožnil měřit i na rezistorech menších jak 4R7, popř. na rezistorech větších výkonů. Při měření se objevil problém s dokončením měření na odporové sadě 5 W 1R, kde z důvodů limitace max. proudu bylo měření pozastaveno, i když deklarovaná maximální zátěž nebyla překročena vlivem vnitřních ochran.



Použití běžně dostupných vinutých výkonových rezistorů do aplikací s impulsní zátěží je možné. Důležitým předpokladem je znalost materiálu, ze kterého je odporový element tvořen. Ze znalosti materiálu, délky odporového drátu, lze spočítat, jakých teplot může odporový drát dosáhnout pro danou aplikaci (specifickým výkonem a dobou pulsní zátěže). Porovnáním teploty s fázovým diagramem lze určit, zda dojde k rekrystalizaci či nikoliv a z toho usoudit vhodnost použití rezistoru s tímto odporovým materiálem.



Seznam použité literatury

- [1] HÖFT, Herbert. Pasívní součástky pro elektroniku. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1983.
- [2] MRAVEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje, II. Elektrické přístroje*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha 1982.
- [3] DRÁPALA, Jaromír a Miroslav KURSA. TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [4] HORNET, Larry E. Resistor Pulse Handling Capability. 1981, s. 44. DOI: AC04-76DP00789. Dostupné z: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/1981/810569.pdf>
- [5] JURSIK, František. *Anorganická chemie kovů*. 1. vyd. Praha: VŠCHT, 2002. ISBN 80-708-0504-8.
- [6] WILLIAMS, Barry W. *Power electronics: Devices, Drivers, Applications, and Passive Components*. Glasgow: University of Strathclyde, 2006. ISBN 978-0-9553384-0-3.
- [7] BUREŠ, Jiří. Měrný odpor: Tabulky měrného odporu [online]. 2002 [vid. 2012-11-15]. Dostupné z: <http://www.converter.cz/tabulky/merny-odpor.htm>
- [8] AZOM. *NiChrome: Nickel Chrome Alloys* [online]. 2000 [vid. 2013-01-01]. Dostupné z: http://www.nickel-alloys.net/nickel_chrome_alloys.html
- [9] HATTORI, Akiyoshi. MATSUSHITA ELECTRIC INDUSTRIAL CO., Ltd. *Metal oxide film resistor* [patent]. Užiténý vzor., US5889459. Uděleno 30. březen 1999. Zapsáno 27. listopad 1996
- [10] NOVÁK, Miroslav. Přechodový děj při zapnutí transformátoru: Způsoby omezování zapínacích proudů. Liberec, 2003. 158 s. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [11] FUKÁTKO, Tomáš. Teplo a chlazení v elektronice. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 118 s. ISBN 80-730-0199-3.



- [12] Wirewound resistors: Pulse Handling Capabilities. In: Vishay [online]. 2008. [vid. 2012-10-16]. Dostupné z: http://www.vishay.com/docs/49076/49076_vmn-pl0396-1103.pdf
- [13] GLADSTONE, Brian. Solving Inrush at the Source. In: Dalitech [online]. 2004. [vid 2012-10-20]. Dostupné z: <http://www.dalitech.com/Resources/Solving%20Inrush%20at%20the%20Source.pdf>
- [14] ROAYLOHM, METAL OXIDE FILM FIXED RESISTORS. 2006. [vid 2012-10-20] Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/cd869c7de2dee8b04ca77e033adc8f8d/mor.pdf>
- [15] PULSE & OVERLOAD CAPABILITY: Application Note. In: *TT electronics* [online]. 2. vyd. Surrey: TT electronics [vid. 2012-10-22]. Dostupné z: http://www.welwyn-tt.com/pdf/application_notes/Pulse-Overload_AN.pdf
- [16] MOORE, Ian. RHOPOINT COMPONENTS. Don't forget the voltage coefficient of your resistors. Německo, 2012. [vid 2012-11-10] Dostupné z: <http://www.electronicweekly.com/news/components/passives/dont-forget-the-voltage-coefficient-of-your-resistors-2012-05/>
- [17] NOVÁK, Miroslav a Roman HEIDLER, Impulsní přetížitelnost metal oxidových rezistorů. *Elektrorevue* [online], Liberec, 2013, roč. 15, č. 1, [vid 2013-03-15] ISSN: 12131539. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/cz/download/impulsni-pretizitelnost-metal-oxidovych-rezistoru/>
- [18] VISHAY. *Wirewound resistor: Pulse Handling Capabilities* [online]. 2008. [vid. 2012-10-22]. Dostupné z: http://www.vishay.com/docs/49076/49076_vmn-pl0396-1103.pdf
- [19] PANTHALA, Seshanna. 1 Inrush Current Control in Transformers. *AU Journal of Technology*. 2002, roč. 5, č. 4. [vid. 2012-10-22] Dostupné z: <http://www.journal.au.edu.au techno/2002/apr2002/article7.pdf>
- [20] TME. *TME – Electronic Components* [online]. [Česká republika]. TME, [2013], [vid. 2013-04-24] Dostupné z: <http://www.tme.eu>

- [21] MACOLA, Jiří. Měření molekulární difuze technikami NMR. *Akademie věd České republiky* [online]. Brno, 2006 [vid. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/06004/index.html>
- [22] LENFELD, Petr. Technologie tváření kovů. TUL FS. *Technologie II: Tváření kovů, zpracování plastů* [online]. [2013] [vid. 2013-05-09]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [23] Computational Thermodynamics: Nickel-Chromium (Ni-Cr) Phase Diagram. COMPUTATIONAL THERMODYNAMICS, *Computational Thermodynamics, inc.* [online]. 2011 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.calphad.com/nickel-chromium.html>
- [24] MUSIL, Vladislav. Výkonové elektronické součástky. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, *Výkonové elektronické součástky* [online]. Brno, 2000 [cit. 2013-05-09]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/00014/index.html>
- [25] KOPAL, Antonín. *Fyzika II: elektřina, magnetismus, Maxwellovy rovnice*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 323 s. ISBN 978-80-7372-311-8.
- [26] CHAN, S. Kwai et all., *Development of a First-Principles Computational Methodology for Predicting Long Term Material Stability and Mechanical Performance*, 18-9420, 2003. [online]. [vid. 2013-05-05]. Dostupné z: <http://www.swri.org/3pubs/ird2005/Synopses/189420.htm>
- [27] ECKERTO VÁ, Ludmila *Fyzikální elektronika pevných látek*. Praha: Univerzita Karlova, 1992, 344 s. ISBN 80-706-6535-1
- [28] MAREK, Jaroslav, *Popisná statistika*, 2009 [přednáška, online], Olomouc [Univerzita Palackého], [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://mant.upol.cz/soubory/MC/predps05.pdf>
- [29] ABRIATA, José P. a David E. LAUGHLIN. The Third Law of Thermodynamics and low temperature phase stability. *Progress in Materials Science*. 2004 [online] , roč. 49, č. 3-4, str. 367-387. DOI: 10.1016/S0079-6425(03)00030-6. [vid. 2013-05-08] Dostupné z: [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425\(03\)00030-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6425(03)00030-6)



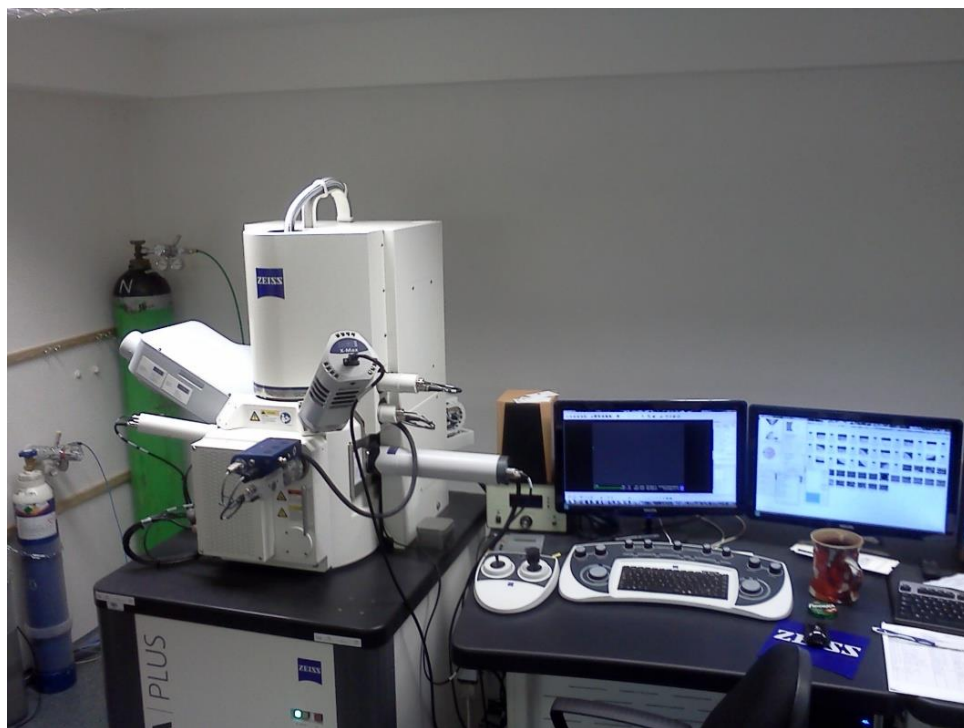
- [30] Patrice E.A. Turchi, et. all, Interface between quantum-mechanical-based approaches, experiments, and CALPHAD methodology. 2007 [online]. Calphad, roč. 31, č. 1., str. 4-27, ISSN 0364-5916, DOI: 10.1016/j.calphad.2006.02.009. [vid. 2013-05-10]
Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0364591606000174>
- [31] Rollett, A. D. a M. De Graef, *Recrystallization: Theoretical & Practical Aspects*, 2006 [přednáška, online], Pittsburgh [Carnegie Mellon], [vid. 2013-04-15]. Dostupné z: http://neon.mems.cmu.edu/rollett/27301/L_suppl_Rex_Sep06.pdf



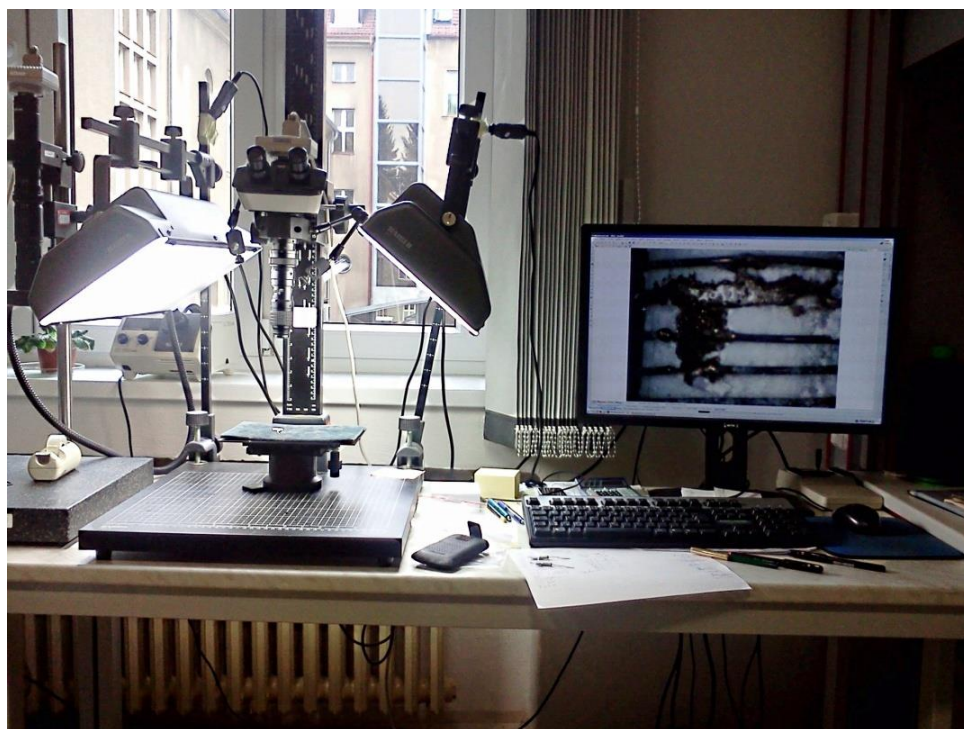
Přílohy

A.	Spektrografie a makro-mikroskopie	78
B.	Obsah CD-RM	81

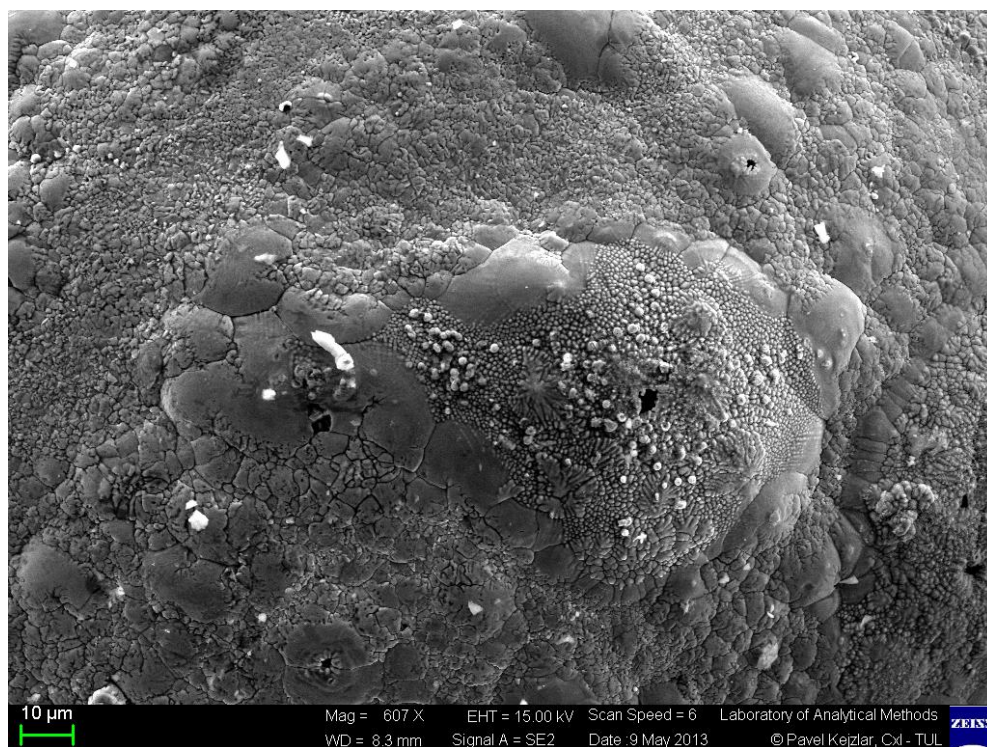
A. Spektrometrie a makro-mikroskop



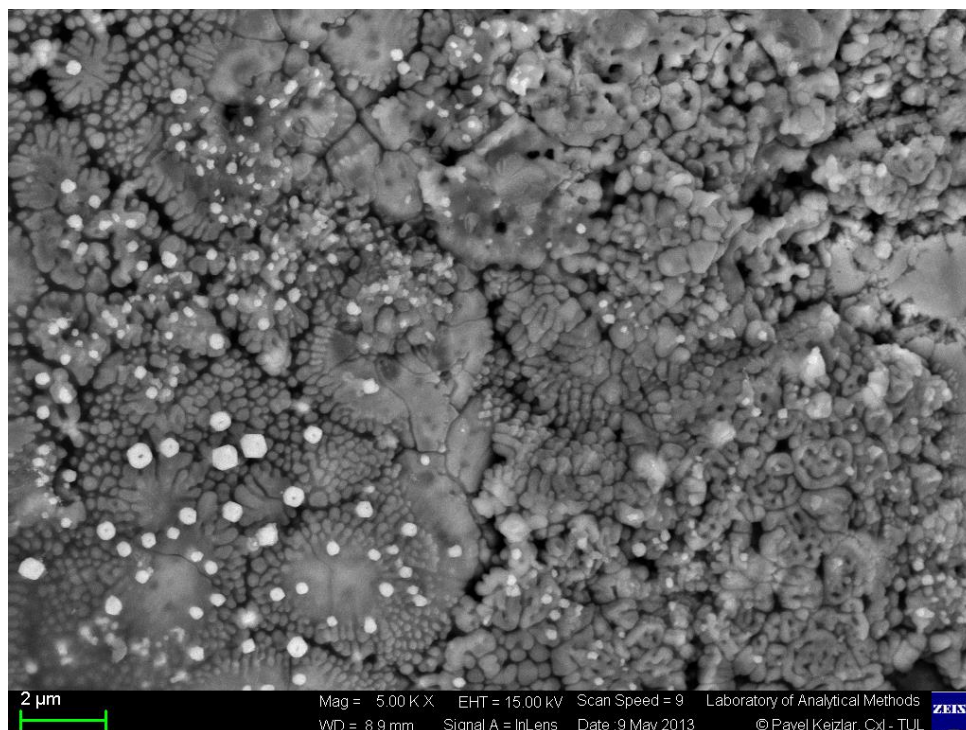
Obr. A1: Elektronový mikroskop a spektrometr Zeiss SUPRA FE-SEMs Plus



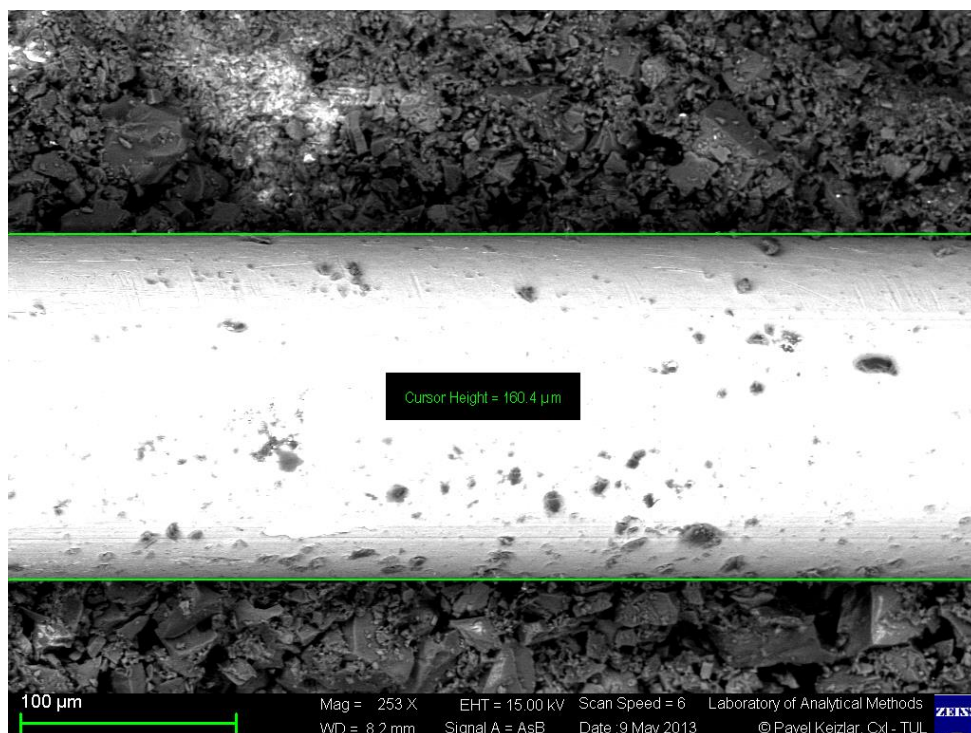
Obr. A2: Makromikroskop FT budov B



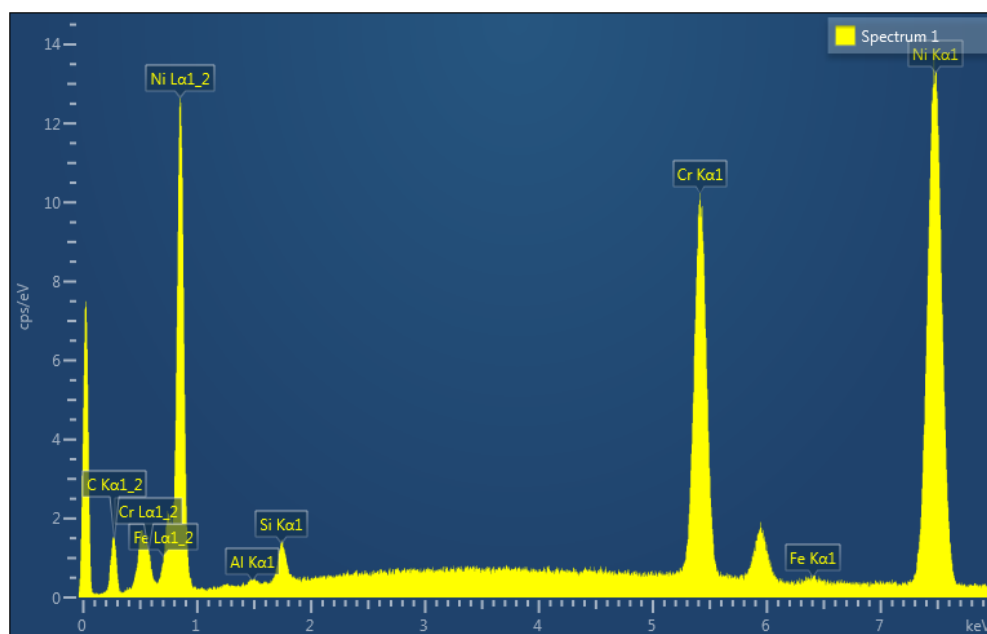
Obr. A3: Místo přepálení rezistoru Royal321 4R7 1.7 pod elektronovým mikroskopem



Obr. A4: Místo přepálení rezistoru Royal321 4R7 1.7 pod elektronovým mikroskopem - detail



Obr. A5: Nepoškozený GES053 82R 5 W pod elektronovým mikroskopem – určení tloušťky odporového drátu



Obr. A6: Spektrogram nepoškozeného GES053 82R pod elektronovým mikroskopem

B Obsah CD-ROM

Na přiloženém CD-ROMu jsou uložena data z měření včetně programů pro zobrazení a zpracování jejich vyhodnocení.

Následuje seznam adresářové struktury CD-ROMu. Uvedeny jsou jen adresáře do první úrovně vnoření.

„*Boxplots*/“

Obsahuje krabicové diagramy měřených rezistorů

„*Dokumentace*/“

Diplomová práce v elektronické podobě.

„*Foto*/“

Fotografie místa poškození rezistorů, pracoviště a data ze spektrometru a snímků z elektronového mikroskopu.

„*Plots*/“

Výsledné grafy impulsních přetížitelností jednotlivých sad rezistorů. Soubory jsou jak ve formě obrázků „**.png*“ tak ve formátu pro zobrazení v Matlabu „**.fig*“.

„*Results*/“

Výsledky experimentů uloženy v datových souborech „**.mat*“. Zdrojové kódy pro zpracování výsledků měření ve formátu „**.m*“.

„*Waves*/“

Oscilogramy průběhu měření zkoumaných rezistorů v datových souborech s koncovkou „**.mat*“.